

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS



Universidad
Carlos III de Madrid

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS NUMÉRICO DE IMPACTOS DE MATERIAL SUBSTITUTIVO DE PÁJARO CONTRA PARED RÍGIDA

AUTOR

RAMÓN DEL CUVILLO MEZQUITA

TUTORES

JOSÉ ALFONSO ARTERO GUERRERO

JESÚS PERNAS SÁNCHEZ

JUNIO 2016

Esta página está en blanco de manera intencionada

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis tutores, José Alfonso Artero y Jesús Pernas Sánchez, por haberme dado la oportunidad de realizar el TFG con ellos. Aún con todos los inconvenientes e imprevistos del año, han sido capaces de sacar tiempos largos para ayudarme y seguir motivándome. Ha sido un verdadero orgullo para mí colaborar con ellos y su investigación. Gracias por no permitir que haga un manual o una novela en vez de un TFG.

También a Marcos Rodríguez Millán, quien me ha introducido en el ámbito de los impactos y presentado a Jesús y José. Gracias por tu tiempo invertido en mí y enseñarme una pequeña parte del mundo interdepartamental.

Por supuesto a mi familia, Carlos, Paloma y Carlos. Que no han dudado un instante y han puesto todos sus medios y paciencia para que esto salga adelante. No hay otra palabra mejor que gracias. Os quiero mucho aunque os lo diga poco.

A mis compañeros, especialmente a Pablo, porque sin esos buenos momentos no hubiese sido lo mismo. De no ser por él, seguiría en segundo montando cables (y lo sabemos tú, Jaime, yo y todos). También mis amigos del liceo y de SCB, que siguen ahí después de tanto.

A Cha, Cris y iesu, que sé no han parado de encomendar este trabajo.

Quiero agradecer a la JMJ haber hecho de este un curso divertido e intenso. Muy especialmente al Staff de laicos, Roci y Alba, que se han preocupado por mí más que nadie y me han tenido entre algodones o listados cuando ha hecho falta.

Un agradecimiento aún más especial para Alba, porque sin ella sería solo ingeniero. *Born to run.*

Por último y por ello el más importante, quiero darle las gracias a mi amigo Jesús, que siempre me ha acompañado y ayudado aun cuando yo no me daba cuenta. Por dármelo todo a cambio de nada. Si hoy estoy aquí, es gracias a Él. Gracias María.

Esta página está en blanco de manera intencionada

RESUMEN

El desarrollo y la optimización de componentes estructurales en el sector aeronáutico son de gran importancia debido al exigente nivel de seguridad y la elevada vulnerabilidad de los materiales compuestos frente a impactos dada su ortotropía.

Por ello, para declarar una alta fiabilidad frente a estos imprevistos como puede ser el impacto de pájaro, se debe proveer a estas zonas de un alto coeficiente de seguridad, y así, en caso de avería, el avión pueda aterrizar con seguridad. Así mismo, para asegurar este aspecto, los ensayos deben ser múltiples y muy rigurosos.

Este trabajo pretende emular uno de los ensayos más importantes que se le hacen a los aviones, el cual consiste en el impacto de un pájaro contra una de las partes. Sin embargo, como en cualquier otro sector, antes de realizar el ensayo real, se diseñan y analizan simulaciones de este para mejorar los parámetros y evitar tener que repetirlo.

Por lo tanto, es necesario encontrar un material que pueda comportarse como lo hace el ave durante el choque. Como este es a muy alta velocidad, el 'proyector' se puede asemejar a un fluido. Al igual que en otros ensayos, se utiliza gelatina balística, pues su densidad y viscosidad se pueden adaptar fácilmente en los procesos de fabricación según el objetivo deseado.

Con el propósito de poder predecir resultados, en este trabajo se busca reproducir el ensayo gracias a un modelado numérico. Después de haberlo validado con los datos experimentales, se efectúan ciertas variaciones para ver cómo pueden repercutir posibles alteraciones de los parámetros el impacto que, al ser a tan alta velocidad, es difícil controlar.

Las variaciones representadas son cambios en la posición longitudinal, en la posición oblicua y en la inclinación de la gelatina.

Con los resultados obtenidos, se podrá predecir otros ensayos que resulten interesantes y validarlos o saber si ha habido algún incidente en la realización.

ABSTRACT

Development and optimization of structural components in the aeronautical industry have large importance due the high security level and vulnerability of the composite materials behavior in the face of impacts because his ortotropic properties.

In order to get this high reliability in the face of an unexpected event like bird strike, is necessary to supply this zones with a high security coefficient, so in breakdown, the plane can land safety. Beside, to claim this aspect, they must get over strict and multiple tests.

This work tries to emulate one of the most important tests that planes get, who consists in a bid impact against one of the parts. Whereas, as well as others industries, before the real test, the company make some simulations and analyze them to improve the parameters and avoid a rerun.

Therefore, it's necessary to find a material that can bring with the bird during all the strike. Due the very high speed of the 'projectile' it can be compare to a fluid material. As used in others tests, thanks of the variability of the density and viscosity in the fabrication progress, the ballistic gelatin is make to use in this work.

This work looks to reproduce the test using a numeric model with the purpose of predicting future results. After the comparison and validation with the experimental information, some variations are made in the impact that, one more time, due the high velocity is complicated to control.

The studied parameters are changes in the longitudinal position, oblique position and the gelatin inclination.

With the results, it could be possible to predict and validate others interesting tests and know if there was a mistake during the realization.

Esta página está en blanco de manera intencionada

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE FRIGURAS	X
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Explicación del trabajo.....	3
1.4 Alcance y límites	4
Capítulo 2 ANTECEDENTES.....	5
2.1 Tipos de daños en la ingeniería aeronáutica	6
2.1.a Impacto de ave.....	6
2.1.b Impacto de granizo	8
2.1.c Otros	9
2.2 Tipos de ensayo de impacto de pájaro	9
2.2.a Normativas al respecto	10
2.2.b Ensayos	10
2.3 Sustituir un pájaro por gelatina	11
2.3.a Motivos	11
2.3.b Antecedentes.....	12
Capítulo 3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA.....	13
3.1 Ensayo experimental	14
3.2 Simulación del ensayo	15
3.2.a Partes.....	16
3.2.b Propiedades de los materiales.....	18
3.2.c Condiciones de contorno.....	20
3.2.d Posibles problemas y soluciones aportadas.....	23

Capítulo 4 RESULTADOS OBTENIDOS	25
4.1 Validación del conjunto	26
4.1.a Por qué y cómo un análisis de frecuencias	26
4.1.b Resultados obtenidos.....	28
4.2 Validación del impacto	29
4.2.a Resultados	29
4.2.b Comparativa	35
4.2.c Fuerza de impacto.....	40
 Capítulo 5 ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO.....	45
5.1 Desplazamiento en X.....	46
5.2 Desplazamiento en XY.....	52
5.3 Inclinación de la gelatina.....	56
 Capítulo 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	62
6.1 Introducción	63
6.2 Conclusiones	63
6.3 Trabajos Futuros	64
 BIBLIOGRAFÍA	65

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: AGRIETAMIENTO DEL PARABRISAS TRAS IMPACTO DE AVE.....	2
FIGURA 1.2: DEFORMACIÓN DEL MORRO TRAS IMPACTO DE AVE	2
FIGURA 2.1: PROBABILIDAD DE IMPACTO DE AVE POR ALTURA.....	6
FIGURA 2.2: PROBABILIDAD DE IMPACTO DE AVE POR ZONA DEL AVIÓN	7
FIGURA 2.4: IMPACTO DE GRANIZO EN EL PARABRISAS	8
FIGURA 2.3: IMPACTO DE GRANIZO EN EL MORRO	8
FIGURA 3.1: CAÑÓN NEUMÁTICO DE LA.....	14
FIGURA 3.2: TUBO HOPKINSON	14
FIGURA 3.3: MALLADO DEL TUBO HOPKINSON	16
FIGURA 3.5: MALLADO DEL TAPÓN	16
FIGURA 3.4: MALLADO DE LA SUFRIDERA.....	16
FIGURA 3.6: MALLADO DE LA GELATINA.....	17
FIGURA 3.7: CONJUNTO TUBO - TAPÓN - SUFRIDERA COMPLETO	18
FIGURA 3.8: VISTA DE DETALLE DE LA UNIÓN ENTRE LAS PARTES	18
FIGURA 3.9: UNIÓN ENTRE EL TUBO Y EL TAPÓN MALLADOS Y VISTA DE DETALLE	21
FIGURA 3.10: SET_SEGM EN LA SUFRIDERA Y VISTA DE DETALLE DE LAS ZONAS SELECCIONADAS	21
FIGURA 4.1: MODOS Y FRECUENCIAS PROPIAS EXPERIMENTALES DEL CONJUNTO	26
FIGURA 4.2: DEFORMACIÓN LONGITUDINAL DEL CONJUNTO CON UNA FRECUENCIA DE 179 HZ.....	28
FIGURA 4.3: DIFERENTES ETAPAS EN EL IMPACTO HIDRODINÁMICO DE LA GELATINA CONTRA UNA PLACA RÍGIDA	29
FIGURA 4.4: PRESIÓN EN LA SECCIÓN INTERNA DE LA GELATINA DURANTE LOS PRIMEROS INSTANTES DE CHOQUE.....	30
FIGURA 4.5: SECUENCIA DE LA PROPAGACIÓN DE ONDA.....	32
FIGURA 5.1: DESPLAZAMIENTO PROGRESIVO EN EL EJE X DE LA GELATINA	46
FIGURA 5.2: DESPLAZAMIENTO PROGRESIVO EN LOS EJES X E Y DE LA GELATINA	52
FIGURA 5.3: INCLINACIÓN PROGRESIVA DE LA GELATINA	56

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 2.1: IMPACTOS DE PÁJARO POR AÑO EN INGLATERRA ENTRE 2005 Y 2009.....	7
GRÁFICA 4.1: TENSIÓN NUMÉRICA OBTENIDA EN LAS BANDAS DEL TUBO A LO LARGO DE LA SIMULACIÓN	33
GRÁFICA 4.2: FUERZA NUMÉRICA OBTENIDA EN LA CARA DE IMPACTO DE LA SUFRIDERA A LO LARGO DE LA SIMULACIÓN	34
GRÁFICA 4.3: TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS A 71 Y 75 M/S	35
GRÁFICA 4.4: TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS A 103 Y 100 M/S.....	36
GRÁFICA 4.5: TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS A 120 Y 125 M/S.....	37
GRÁFICA 4.6: TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS A 150 M/S	38
GRÁFICA 4.7: TENSIÓN MÁXIMA OBTENIDA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE CADA ENSAYO	39
GRÁFICA 4.8: TENSIÓN MÁXIMA OBTENIDA EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE CADA ENSAYO	39
GRÁFICA 4.9: COMPARACIÓN DE LA FUERZA RESULTANTE EN LA CARA DE LA SUFRIDERA A 100 M/S.....	41
GRÁFICA 4.10: COMPARACIÓN DE LA FUERZA RESULTANTE EN LA CARA DE LA SUFRIDERA A 70 M/S.....	41
GRÁFICA 4.11: COMPARACIÓN DE LA FUERZA RESULTANTE EN LA CARA DE LA SUFRIDERA Y EN EL TUBO A 125 Y 150 M/S	42
GRÁFICA 4.12: COMPARATIVA DE LA EVOLUCIÓN DE LA FUERZA EN EL CONTACTO Y EN EL TUBO CON RESPECTO A LA VELOCIDAD	43
GRÁFICA 5.1: TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 10 MM.....	47
GRÁFICA 5.2: COMPARACIÓN DEL PROMEDIO DE LA TENSIÓN DE LAS BANDAS LATERALES Y LA SUPERIOR CON LA ORIGINAL PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 10 MM	48
GRÁFICA 5.3: COMPARACIÓN DE LA FUERZA OBTENIDA ENTRE EN EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y LA ORIGINAL PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 10 MM	48
GRÁFICA 5.4: TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 25 MM	49
GRÁFICA 5.5: COMPARACIÓN DEL PROMEDIO DE LA TENSIÓN EN LAS BANDAS LATERALES Y LA SUPERIOR	50
GRÁFICA 5.6: COMPARACIÓN DEL PROMEDIO DE LA TENSIÓN EN LAS BANDAS LATERALES Y LA SUPERIOR CON LA ORIGINAL PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 50 MM	51
GRÁFICA 5.7: COMPARACIÓN DE LA FUERZA OBTENIDA ENTRE EN EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y LA ORIGINAL PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 50 MM	51

GRÁFICA 5.9: COMPARACIÓN DEL PROMEDIO DE LA TENSIÓN OBTENIDA EN LAS CUATRO BANDAS Y EN LOS LATERALES CON LOS DATOS ORIGINALES	54
GRÁFICA 5.8: COMPARACIÓN DE LA TENSIÓN OBTENIDA CON EL PROMEDIO DE LAS CUATRO BANDAS Y DE LAS LATERALES CON LOS DATOS ORIGINALES.....	54
GRÁFICA 5.10: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA UN DESPLAZAMIENTO DE 50 MM EN LOS EJES X E Y	55
GRÁFICA 5.11: COMPARACIÓN DE LA TENSIÓN OBTENIDA EN LAS BANDAS CON LA ORIGINAL A 15°	57
GRÁFICA 5.12: COMPARACIÓN ENTRE EL PROMEDIO DE LA TENSIÓN DE LAS BANDAS SUPERIOR E INFERIOR CON LA ORIGINAL A 30°	57
GRÁFICA 5.13: COMPARACIÓN DE LA FUERZA OBTENIDA EN EN EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y LA ORIGINAL PARA UNA INCLINACIÓN DE 30°	58
GRÁFICA 5.14: COMPARACIÓN DE LA FUERZA OBTENIDA EN EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y LA ORIGINAL PARA UNA INCLINACIÓN DE 45°.....	58
GRÁFICA 5.15: COMPARACIÓN ENTRE EL PROMEDIO DE LA TENSIÓN DE LAS BANDAS SUPERIOR E INFERIOR CON LA ORIGINAL A 45°	58
GRÁFICA 5.16: COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS A DISTINTOS ÁNGULOS DE IMPACTO	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: REQUERIMIENTOS EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE LAS TURBINAS	10
TABLA 3.1: RESULTADOS DEL MALLADO EN NODOS Y ELEMENTOS POR PARTES	17
TABLA 3.2: PROPIEDADES DE LOS METALES	19
TABLA 4.1: COMPARATIVA DE FRECUENCIAS MODALES ENTRE CONJUNTO REAL Y EL NUMÉRICO	28
TABLA 4.2: COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE TENSIÓN OBTENIDOS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD, LA MASA Y LA ENERGÍA CINÉTICA	39
TABLA 4.3: COMPARATIVA DE LAS FUERZAS OBTENIDAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA MASA	42
TABLA 5.1: TENSIÓN MÁXIMA OBTENIDA EN LAS BANDAS PARA UN DESPLAZAMIENTO EN X E Y DE 10 MM	52
TABLA 5.2: TENSIÓN MÁXIMA DE LAS BANDAS PARA $A=30^\circ$	57
TABLA 5.3: COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS A DISTINTOS ÁNGULOS DE IMPACTO	59
TABLA 5.4: RESULTADOS DEL CAPÍTULO 5	60

Esta página está en blanco de manera intencionada

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Según el informe de "Air Transport Action Group" publicado en Abril de 2014: "Aviation Benefits Beyond Borders" la industria aérea mueve más de $2,1 \cdot 10^6$ Millones de euros al año, 2.4 Trillones de Dólares americanos [1]. Por otro lado, es sabido que un avión que está en tierra implica que una compañía está dejando de ganar dinero.

Una parte importante del tiempo que los aviones están en tierra es en el departamento de ingeniería. Este se encarga de verificar que la aeronave puede volar sin problemas ni riesgos. Cada vez que hay un accidente por pequeño que sea, o falla algún componente, todo el avión ha de pasar por un estricto control en el que es desmontado y vuelto a montar si todo está en orden, o con cambios de piezas si es necesario.

Como posibles accidentes, encontramos los impactos externos. Hielo, pájaros, neumáticos... Ya solo en el sector aeronáutico existe una tan amplia variedad de posibilidades que es imposible estudiarlos todos. Sin embargo, la totalidad tienen el mismo punto de partida: la transformación de energía cinética en energía térmica, sonora y de deformación (la más importante en este ámbito). Abollar el morro (Figura 1.2) partir un aspa de la turbina o romper el cristal (Figura 1.1) de la cabina son grandes consecuencias de estos impactos.



Figura 1.2: Deformación del morro tras impacto de ave



Figura 1.1: Agrietamiento del parabrisas tras impacto de ave

Focalizando en el impacto de pájaros, comúnmente conocido como 'bird strike' por su traducción al inglés, según la empresa europea Airbus, tanto en el morro como en las turbinas se producen un 41% de los choques [2]. De este mismo artículo, se saca que entre un 15 y un 20% de los impactos causan daños en el avión.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque la mayoría de aeropuertos tienen sus propios métodos de seguridad frente a este accidente, es inevitable que ocurra. Por ello existe la necesidad de fabricar y estudiar los componentes de modo que las consecuencias no sean desproporcionadas con lo ocurrido. Consiguientemente, a nivel internacional se han ido desarrollando normativas de ensayo y técnicas para prever los resultados.

1.2 Objetivos

Cada vez que se realiza uno de los ensayos a los que obligan las autoridades, es necesario poner una turbina en funcionamiento, una placa del fuselaje o el morro del avión dispuestos a recibir el impacto de un pájaro a más de 100 m/s. Una vez realizado el experimento, la parte probada obviamente ya no es operativa.

Esto significa que cada vez que se desea realizar un ensayo es necesario invertir un dinero que no se podrá recuperar. Por ello, las empresas de fabricación de aeronaves buscan métodos para imitar o programarlos. Una de estas formas, es el impacto de gelatina en una placa de acero, y por consiguiente, el cálculo numérico.

El objetivo de este trabajo es encontrar, a través de un método numérico, unos resultados que sean capaces de reproducir el ensayo experimental con gelatina que se realiza en la Universidad Carlos III de Madrid y posteriormente aplicar algunas variaciones paramétricas para ver cómo afectan al modelo.

1.3 Explicación del trabajo

Para cumplir con los objetivos, se ha optado por utilizar el código comercial de elementos finitos LS-DYNA v.R7, que permite obtener y tratar fácilmente los resultados del experimento físico.

El trabajo consta de cuatro capítulos, entre los cuales se expondrán algunos de los ensayos y artículos publicados similares a éste. Posteriormente, cómo es el ensayo que realiza la universidad y de qué manera se ha procurado imitarlo lo más fielmente posible para en otro capítulo, dar los resultados que se obtienen y aplicar las variaciones paramétricas para ver cómo afectarían algunos errores a los resultados.

Finalmente, se presentarán las conclusiones oportunas y se validará, o no, la simulación hecha.

1. INTRODUCCIÓN

1.4 Alcance y límites

Es sabido que el MEF proporciona soluciones bastante fiables a un problema, aunque no exactas. Gracias a que el programa que se va a utilizar no tiene restricción de nodos, se consigue disminuir la malla para obtener mejores resultados, especialmente donde impacta la gelatina contra la placa de acero.

Por otro lado, la facilidad de variar los parámetros tanto de la velocidad y la posición de la gelatina hacen sencillo probar distintos tipos de impacto para ver cómo afectarían a los resultados que se obtienen.

No obstante, el principal límite de esta simulación (como todas las dinámicas que se resuelven por medio de elementos finitos) es el tiempo de cálculo. Cada simulación tarda entre 10 y 12 horas a no ser que se hagan simplificaciones. Aun así, no se consigue reducir el tiempo más de 4 horas, lo cual es aceptable.

Otro obstáculo importante es las propiedades de la gelatina. Las características de esta son difíciles de hallar a tan altas velocidades, y la documentación para modelar la gelatina es escasa y poco fiable en algunos casos.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

El objetivo de este capítulo es mostrar por qué es necesario hacer ensayos con gelatina balística.

Partiendo de unos datos estadísticos y por tanto de los requerimientos de las aeronaves, se recopilan algunas técnicas existentes para imitar dichos ensayos.

2.1 Tipos de daños en la ingeniería aeronáutica

Lo primero de todo, es la presentación de los datos estadísticos que hacen necesarios los ensayos pertinentes.

2.1.a Impacto de ave

Según la CAA inglesa (Civil Aviation Administration) uno de cada cien vuelos sufre un choque con un pájaro. Aunque la mayoría son durante el despegue o aterrizaje (a menos de '500 ft'; 0,15 km), que es cuando el avión está acelerando o reduciendo, y por tanto va a menos velocidad, hasta un 20% causan daños en el avión [2].

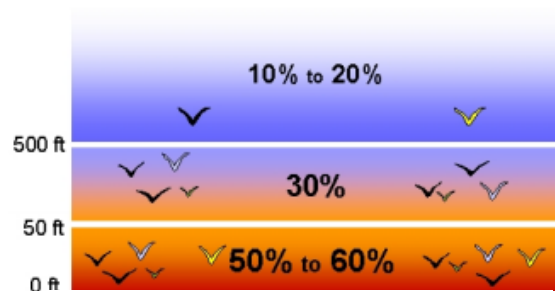


Figura 2.1: Probabilidad de impacto de ave por altura

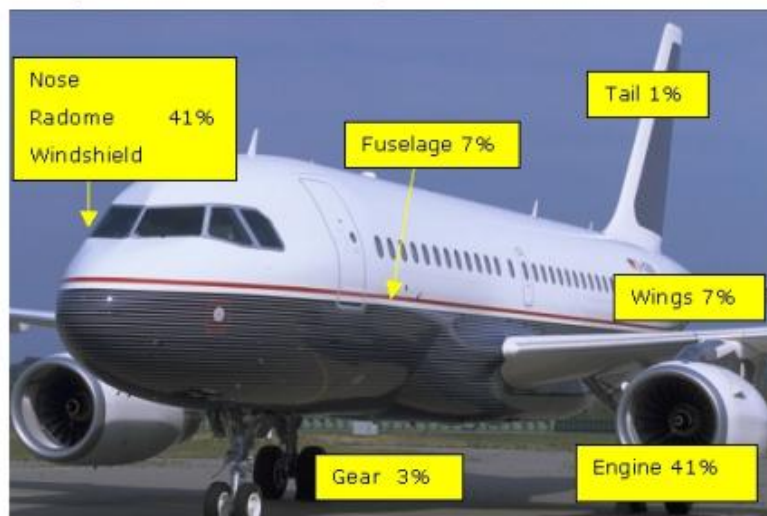
De este mismo documento, se puede obtener la proporción de impactos que se lleva cada una de las partes del avión, cuya imagen se muestra en la Figura 2.2. La parte más delicada y a la vez más importante son los motores, los cuales deben, por motivos de seguridad obvios, conseguir sufrir los menores daños posibles. Citando textualmente:

- *One bird strike out of five causes damage to the aircraft.*
- *Two bird strikes out of three cause either a delay of one hour and a half for aircraft and engine check, or a longer delay for engine change or structure repair.*
- *Following a bird strike during take off or climb, one aircraft out of three does not fly to destination (RTO, IFTB or diversion).*
- *Bird strike on the radome can significantly increase fuel consumption, due to drag in crease.*
- *Approximately 50 % of engine bird strikes damage the engine(s).*
- *When an engine strike occurs and damages the engine, usually:*
 - *The fan blades are damaged with significant vibrations*

2. ANTECEDENTES

- *The EGT increases.*
- *Approximately 20 % of engine bird strikes at take off and climb cause an In-Flight Turn Back (IFTB).*
- *Approximately 25 % of engine bird strikes at take off result in the flight crew rejecting the take off.*
- *Only 2% of engine bird strikes require the flight crew to shut down the engine.*

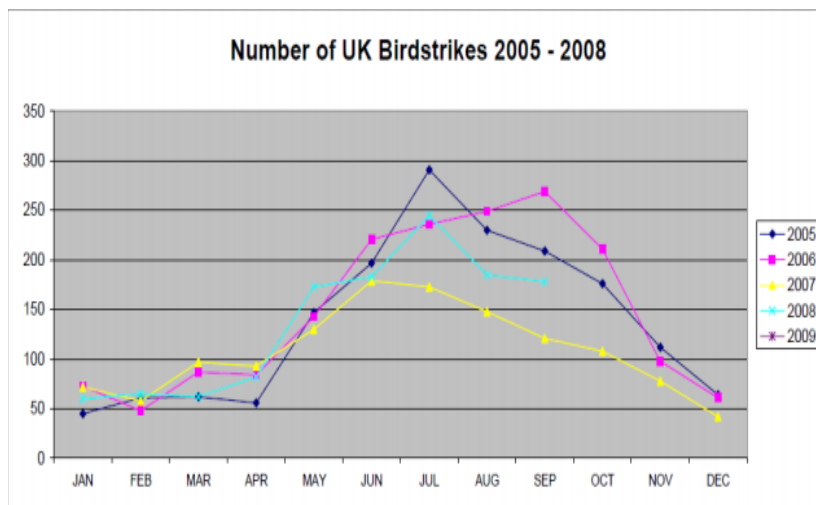
Como en cualquier accidente, las consecuencias dependen de las características. En este caso, el daño depende del peso del pájaro, la velocidad relativa del avión y la zona de impacto principalmente (también el ángulo de impacto y el tipo de pájaro en menor medida). Por ello, para quedarse del lado de la seguridad, cualquier aeronave ha de ser capaz de mantener unas condiciones mínimas tras este choque, incluso funcionar con un solo motor si fuera necesario.



(Source: Airbus)

Figura 2.2: Probabilidad de impacto de ave por zona del avión

John R.Allan tasa en 1,2 billones de dólares americanos al año el coste de birdimpacts a causa siniestro total del avión por accidente, reparación de piezas, pero también retrasos ocasionados o IFTB [3].



Gráfica 2.1: Impactos de pájaro por año en Inglaterra entre 2005 y 2009

2. ANTECEDENTES

Como último dato estadístico, Bird Strike Committee USA responsabiliza a este accidente de más de 250 muertes desde 1988 [4].

Por este motivo existen normativas, leyes e inspecciones que controlan que se respete esta fiabilidad para con los pasajeros y la tripulación al máximo posible.

2.1.b Impacto de granizo

Otro accidente por impacto que se estudia y analiza es el del granizo. El mayor problema de esta colisión es que nunca es únicamente un impacto, si no un continuo, uno por cada 'cubo de hielo'.

Como se muestra en la Figura 2.4 y Figura 2.3 son muchos los golpes que la aeronave tiene que soportar. Si además, varios van impactando respectivamente en el mismo lugar, la parte va sufriendo cada vez una mayor deformación plástica y va perdiendo rigidez.

Este daño tiene características muy similares a las del bird strike. Es un elemento externo y proveniente de la naturaleza, y por tanto aleatorio y no previsible, que choca contra una parte del avión. Su daño es también función del tamaño de bloque y de la velocidad del avión. Aunque en este caso los bloques son más pequeños y ligeros que los pájaros, su rigidez es mayor y en el momento de impacto, es más probable que la velocidad relativa sea mayor, pues el granizo puede estar a cualquier altura siempre que las nubes estén por encima (hasta los 8 km frente a los 2 km de los pájaros).



Figura 2.4: Impacto de granizo en el morro



Figura 2.3: Impacto de granizo en el parabrisas

Quizá por ser menos común por las condiciones climatológicas necesarias o por que no ha producido tantos daños a lo largo de los años, existen menos ensayos y datos estadísticos de este daño.

Por tanto, la única conclusión de este apartado es que el impacto por granizo también puede causar daños importantes en el avión y su estudio es necesario.

2.1.c Otros

El otro impacto importante que se puede producir es durante el despegue o aterrizaje, que una de las piezas del propio avión impacte contra este.

Aunque parece poco probable, en realidad existen varios casos documentados en los que esto ha sucedido. Generalmente, es el neumático el que por alguna razón explota y choca contra la aeronave.

El ejemplo más catastrófico sucedido es el del Concorde, el 25 de Julio de 2000, cuando el avión supersónico, capaz de superar la velocidad del sonido en vuelo, levantó durante el despegue una pieza de la turbina de otro avión que hizo explotar una rueda del tren de aterrizaje, que a su vez, impactó a más de 300 km/h contra el ala izquierda, provocando una onda de presión (como la que se estudiará más adelante) y rompiendo un depósito de combustible, causando el choque del avión y la muerte de 113 personas [5].

Desde entonces, además de repasar la pista cada pocos vuelos en busca de objetos peligrosos, los aviones deben, por normativa, proteger los neumáticos de forma que no puedan explotar y causar este tipo de daños por impacto.

No tiene sentido realizar ensayos o simulaciones de todos los impactos posibles, ya que puede ser cualquier pieza la que choque contra cualquier parte del avión. Lo que sí es necesario, sabiendo que puede ocurrir, es diseñar los componentes de forma que las consecuencias no sean desorbitadas en comparación con el daño producido.

2.2 Tipos de ensayo de impacto de pájaro

Este trabajo se centra en el impacto de pájaros, por ello a continuación se dan las normativas más importantes que existen al respecto y algunos de los ensayos o artículos publicados que tengan relevancia con el problema a resolver.

2. ANTECEDENTES

2.2.a Normativas al respecto

El primer punto a saber sobre las normativas que existen al respecto de los ensayos de bird strike es que se redactan según ocurren. Esto significa que cuando hay un accidente, consecuentemente hay una nueva actualización de la normativa.

El ejemplo más reciente de esto, sucedió el 15 de Enero de 2009, cuando un Airbus A320 tuvo que realizar un amerizaje en el río Hudson a causa de una bandada de barnaclas canadienses que impactaron contra el fuselaje y los motores. Nada más ocurrir dicho accidente, la normativa cambió haciendo necesario que, las aeronaves que fueran a volar por esa zona migratoria, deberían llevar unos motores capaces de 'ingerir' este tipo de gansos.

A día de hoy, la normativa vigente en Europa exige a los aviones que soporten en cualquiera de sus partes (a excepción de las turbinas) un impacto de pájaro según el volumen de la aeronave. Esto significa que un CS-23 (Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes) no tiene que estar preparado para el mismo impacto que un CS-25 o CS-27 (Large Aeroplanes y Small Rotorcraft respectivamente). Cada tipo de avión tiene sus propias exigencias impuestas por la EASA (European Aviation Safety Agency), lo cual es lógico pues cumplen un servicio distinto.

Exigen por ejemplo, que un CS-25 soporte el impacto de un pájaro de 1,8 kg a la velocidad de crucero [6].

Por otro lado, la normativa CS-E 800 [7] muestra los pesos de pájaro que tiene que ser capaz de asumir las turbinas según su tamaño. A continuación, una de las tablas que proporciona:

Engine Inlet throat Area (A) m ²	Mass of Bird kg
$A < 2.50$	Not applicable
$2.50 < A < 3.50$	1.85
$3.50 \leq A < 3.90$	2.10
$3.90 \leq A$	2.50

Tabla 2.1: Requerimientos en función del área de las turbinas

2.2.b Ensayos

El ensayo más practicado y obligatorio de este choque es ensayar el propio impacto. Con un cañón de gas se propulsa un pájaro de iguales dimensiones y peso que dicte la normativa.

En el caso del motor, como ya se ha citado anteriormente, según el área de entrada las aspas deben ser capaces de ‘triturar’ el ave de modo que sea lo menos dañino posible. Generalmente, en el ensayo se utiliza un ave dormida, pero viva para que la temperatura, densidad y compacidad sean lo más reales posibles.

Un sencillo video explicativo del ensayo está en [8] en el cual se muestra como el motor en funcionamiento, y con las aspas marcadas para diferenciarlas a cámara lenta, sufre el impacto de un pájaro y posteriormente, se rompe. Sin detallar más este ensayo, pues no es el objetivo del trabajo, concretar que la velocidad de giro es tan alta (entre 10000 y 15000 rpm), que cualquier pequeña vibración o desequilibrio se convierten en grandes fuentes de problemas. Para conocer los daños ocasionados se utilizan boroscopias.

Por otro lado, otras partes como el morro o los cristales también son puestos a prueba. El ensayo es muy similar, consta también de un cañón de gas con el cual se proyecta un pájaro a gran velocidad. En este caso, otros métodos como ultrasonidos son necesarios para ver los posibles daños ocasionados como pueden ser fisuras, deformaciones plásticas o grietas.

Empresas como AERNOVA se dedican a estas acreditaciones. En Estados Unidos, este tipo de normativas las redacta la FAA y certifican departamentos como Engine Certification Office (ECO).

2.3 Sustituir un pájaro por gelatina

Para cerrar el capítulo se presentan los motivos y algunos ensayos que se realizan con gelatina balística para imitar el impacto de pájaros en los aviones.

2.3.a Motivos

La necesidad de testar el avión ante un impacto de pájaro ha quedado clara. Sin embargo, como en cualquier otro sector de la industria, antes de embarcarse en el ensayo último, se hacen prototipos o simulaciones.

En aeronáutica y para los ensayos que se han comentado en el apartado anterior, es necesario poner en marcha una turbina o disponer de una placa de fuselaje y disparar a gran velocidad un ave contra dicha parte. Para evitar tener que repetir el ensayo en caso de ser no apto y por tanto la inversión de dinero que supone cada uno, se emplean técnicas muy avanzadas que emulen este experimento.

2. ANTECEDENTES

Por otro lado, y con cierta importancia hasta un punto, algunos colectivos protectores de animales protestan contra el uso de aves, casi siempre vivas, para testar estas partes del avión.

Por último, al existir tal cantidad de especies diferentes de pájaros y su comportamiento a la hora del choque tiene tanta dispersión en función del propio animal, del lugar de procedencia, alimentación, etc, que el homologar partes de avión debe ser reproducible no importando dónde se realice el ensayo.

La búsqueda de un material que tenga un 100% de reproducibilidad y por tanto sea homologable además de económica culminó en la gelatina balística.

De estas razones nace la necesidad y posibilidad de encontrar un ensayo que pueda estudiar lo que ocurre durante el impacto de un pájaro en un avión en vuelo a más de 100 m/s de velocidad relativa. También así, es posible variar parámetros y conocer de qué formas se pueden prevenir o por lo menos disminuir los daños.

2.3.b Antecedentes

Uno de los primeros estudios de propiedades lo hace Wilbeck [9], donde demuestra experimentalmente que el mejor modelado para un impacto de ave es a través las ecuaciones de estado del agua y una densidad de 950kg/m^3 .

Desde entonces, múltiples investigadores y agencias como la NASA han ido desarrollando la técnica. Esta última por ejemplo, presenta en [10] donde la gelatina balística queda como: “frequently used as a surrogate for actual bird carcasses in bird strike tests” y hace el ensayo del impacto impulsándola con un cañón neumático y midiendo la deformación provocada.

También Jun Liu et al. [11] realizan un ensayo muy similar pero variando la velocidad del proyectil y el material impactado.

Aunque hay muchos más, por último y más cercano, en la Universidad Carlos III de Madrid los investigadores Jesús Pernas y José Alfonso Artero realizan junto con la empresa ITP, un estudio exhaustivo del impacto de gelatina en una placa rígida, emulando el choque de un pájaro a distintas velocidades, con varios tubos y otros posibles parámetros. En el cual, midiendo la deformación que provoca, se obtiene la fuerza que transmite.

Es de este último del que surge el presente trabajo.

Capítulo 3

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

En esta parte se explicará cómo se hace el modelado del ensayo, partiendo del ensayo experimental y sus componentes para posteriormente, entender mejor las bases y el porqué del modelado numérico.

Por otro lado se encuentra el ensayo de frecuencias y modos propios. Como este ensayo no ha sido realizado por la Universidad Carlos III si no que otro laboratorio ha dado los resultados, no se explicará en este capítulo. Únicamente se contará las variaciones con respecto al ensayo de impacto y sus resultados en el siguiente.

3.1 Ensayo experimental

El ensayo que se va a ilustrar es el citado previamente, el impacto de gelatina balística contra una placa de acero y medición de la deformación.

Este se realiza en el parque tecnológico de la Universidad Carlos III de Madrid, situado fuera del campus debido a las necesidades de espacio que se requieren. Este ensayo consta de 3 conjuntos: un cañón neumático (Figura 3.1) un tubo con las bandas extensiométricas (Figura 3.2), y la gelatina.



Figura 3.1: Cañón neumático de la Universidad Carlos III de Madrid

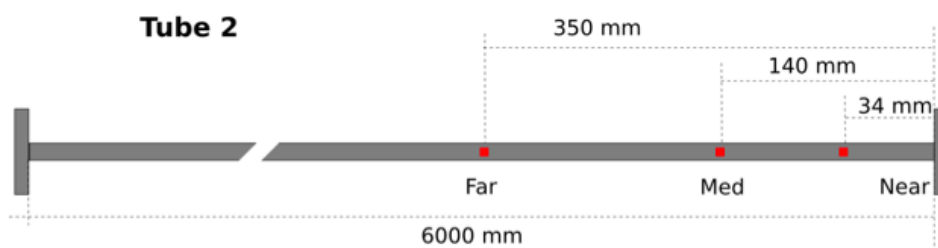


Figura 3.2: Tubo Hopkinson

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

Este es muy simple, ya que supone únicamente disparar la gelatina contra el tubo, el cual recibe el choque en una placa de acero, en adelante sufridera, que transmite la onda de impacto al tubo pasando por otra pieza que les une a ambos, en adelante tapón. Estas dos están colocadas en ambos extremos del tubo para equilibrarlo. Lo único a destacar es que se utiliza gas para acelerar la gelatina, por lo que se puede regular la velocidad deseada en función de la presión que se inyecte en el cañón. Las principales características de cada una de las piezas vienen dadas en los anexos 1 y 2.

Una vez la gelatina colisiona contra la sufridera, esta transfiere una onda de tensión en dirección longitudinal al tubo. Como ya se ha dicho, el tubo tiene unas galgas extensiométricas que miden la deformación. Sabiendo que el tubo es de Aluminio AW6066 T-66, con límite de elasticidad de 120 MPa y suponiendo que la onda es de unos 50 MPa, se puede considerar que todo el ensayo se realiza en el dominio elástico y por tanto que el material cumple en todo momento la Ley de Hook. Por ello, utilizando las ecuaciones de la elástica (1), se puede obtener la tensión que hay en cualquier sección del tubo. En este caso, las bandas se sitúan al principio del tubo ya que es donde la onda está mejor definida, a 90 mm y 300 mm del comienzo de este (no exactamente en la posición que indica la imagen), en el plano paralelo al suelo que corta por el centro de la sección.

Otros aspectos a recalcar son la longitud del tubo, 6 metros, para dar el mayor tiempo posible a que la onda transmitida llegue al final del tubo antes de que vuelva la reflejada en el cambio de material. Además, el tener poco espesor ($D_{ext}=80$ mm; $D_{int}=76$ mm) ayuda a amplificar la onda por el bajo área de sección transversal.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

3.2 Simulación del ensayo

Se procede a contar todo lo relativo a la simulación. El objetivo es comprender los pasos seguidos y todas las decisiones tomadas a la hora de crear la simulación. Para ello, se expone una breve descripción de cómo se han creado las partes, la interacción que hay entre ellas y las condiciones iniciales que le imponemos al problema.

Para este trabajo se ha utilizado el código comercial de elementos finitos de algoritmo explícito LS-DYNA, el cual está especialmente enfocado a la resolución de problemas dinámicos no lineales, lo que abarca este caso concretamente.

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

3.2.a Partes

La simulación del ensayo está compuesta por el mismo número de piezas que el ensayo real y colocadas de forma idéntica. Esto significa que se constituye 6 partes: el tubo, dos tapones (uno a cada lado), dos sufrideras (una a cada lado) y una que representa la gelatina.

Todas las partes se diseñan en el programa ABAQUS por ser más sencillo y rápido a la hora de crear piezas de perfil más complejo, como se ha visto que es el del tapón.

Para simplificar el mallado posterior como eliminar posibles errores de las piezas, se ha suprimido la rosca de la sufridera y del tapón, dándole el mismo radio a ambas partes en la zona en la que se unirán.

A la hora de crear el mallado, hay que destacar que todas las piezas son de revolución, y por defecto la malla no es estructurada. Para que el programa deje cambiar el tipo y que los elementos sean tipo hexaédricos, son necesarias varias particiones al cuarto de las piezas y proyecciones de los cambios de sección a las caras externas. De esta forma, se puede conseguir la malla deseada y un mejor control sobre el número de nodos. El resultado de esta operación es el que se muestra en las Figura 3.3 a Figura 3.5.

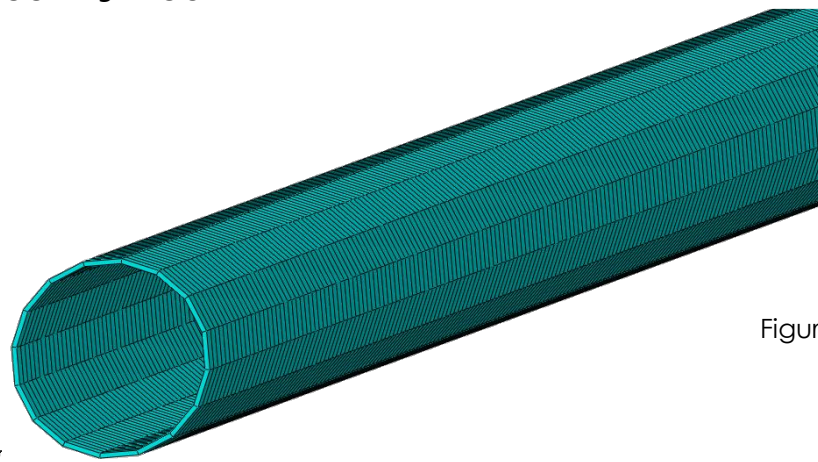


Figura 3.3: Mallado del tubo Hopkinson

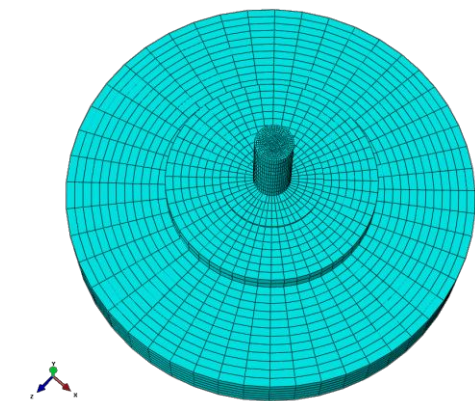


Figura 3.4: Mallado de la sufridera

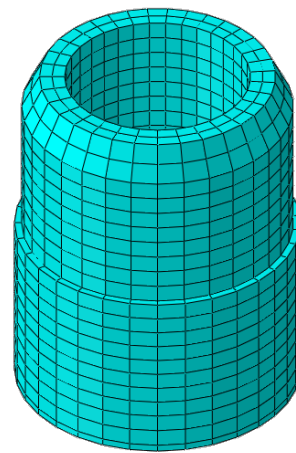


Figura 3.5: Mallado del tapón

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

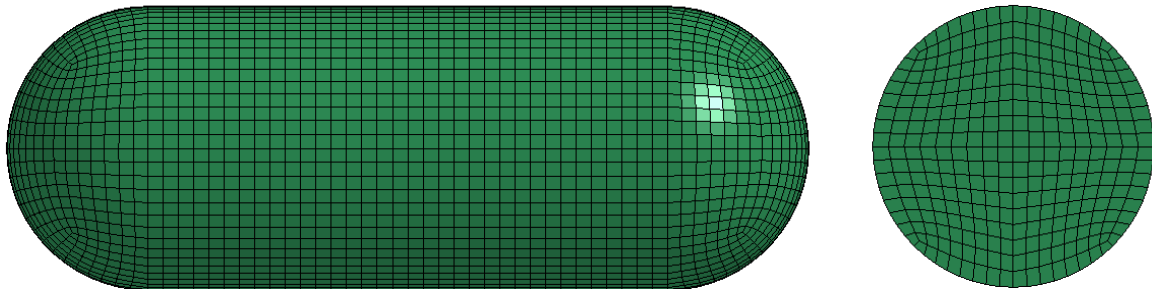


Figura 3.6: Mallado de la gelatina

*La Figura 3.6 está importada desde LS-DYNA para poder ver el mallado interior.

Hay que observar como en la zona de impacto de la sufridera hay un mayor número de nodos para tener mayor precisión de lo que ocurre en esta zona.

Las partes que se obtienen se importan ya malladas al programa de elementos finitos LS-DYNA en formato .inp para conservar el tipo de elemento y el número de nodos. Para montar el conjunto se utilizan las funciones de rotación y coincidencia de puntos. Como este proceso es más tedioso que interesante, lo único con lo que se debe ser especialmente cuidadoso es con no dejar 'brechas' entre las partes a la vez que no se superpongan y queden bien alineadas.

Parte	Distancia media entre nodos (mm)	Número de nodos	Número de elementos
Sufridera	4	17796	15776
Tapón	5	2958	2006
Tubo	15	12832	6400
Gelatina	3	17747	15872
Total	-	51333	40054

Tabla 3.1: Resultados del mallado en nodos y elementos por partes

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

El conjunto obtenido es el siguiente:

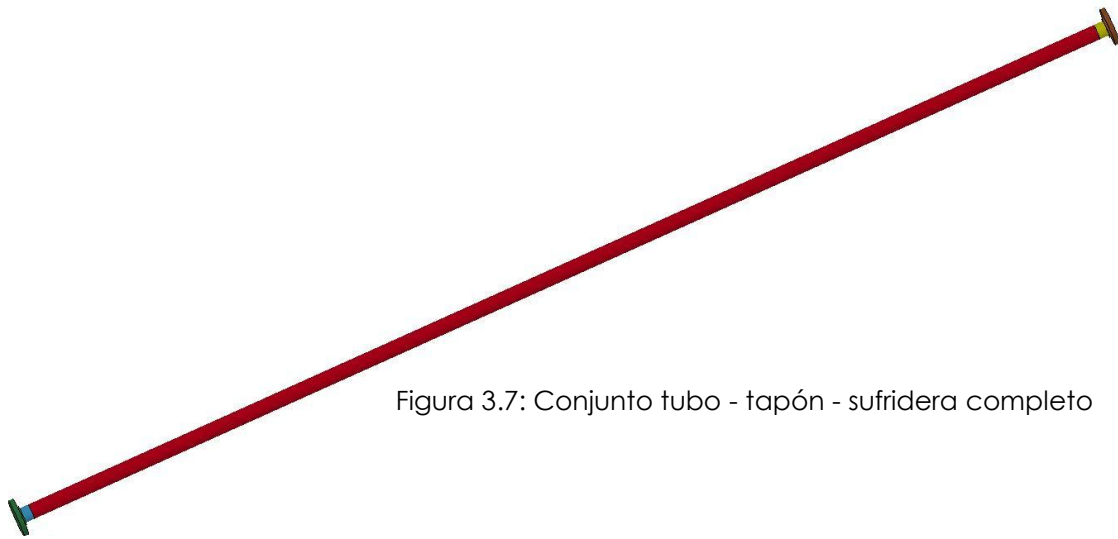


Figura 3.7: Conjunto tubo - tapón - sufridera completo

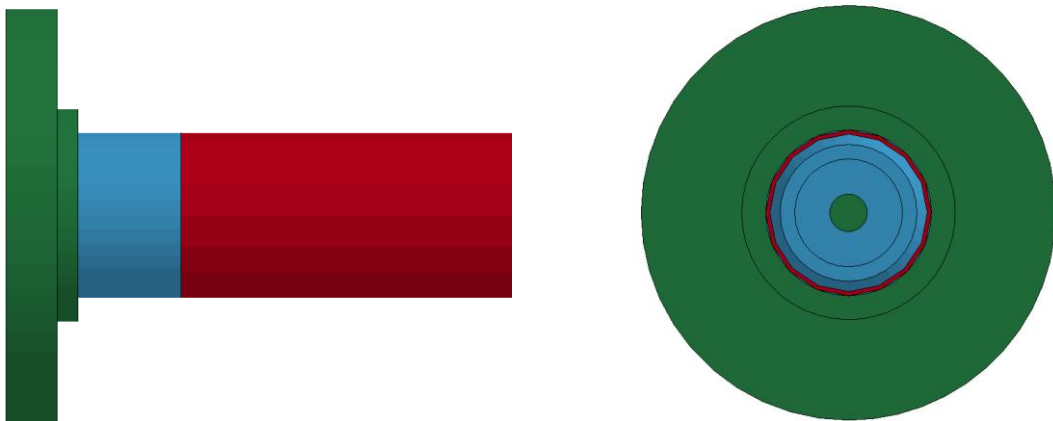


Figura 3.8: Vista de detalle de la unión entre las partes

En este apartado es importante destacar que cuanto más cerca esté la gelatina de la sufridera, menos tiempo de cálculo será necesario, por ello se pone justo en frente de esta, a pocos milímetros para que no llegue a tocar, y esté perfectamente alineada con el tubo.

3.2.b Propiedades de los materiales

En cuanto a los materiales del conjunto se refiere, las propiedades de los metales introducidos son los mismos que en el ensayo experimental como se refleja en la Tabla 3.2. A la hora de modelarlos, se asume que su comportamiento es totalmente elástico y por supuesto isótropo. Por ello, de entre las opciones que ofrece el programa se escoge *ELASTIC. Aunque las propiedades son muy similares entre el tubo y el tapón, como no son iguales habrá una onda reflejada cuando la que analizamos alcance el tapón. Por esta razón, se diferencia también en el modelado de ambos materiales.

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

ID Ls-Prepost	Material	Densidad ρ (kg/m ³)	Modulo de elasticidad E (Pa)	Coeficiente de Poisson ν
1	Aluminio Tubo	2500	$70,6 \cdot 10^9$	0,28
2	Aluminio Tapón	2500	$71 \cdot 10^9$	0,3
3	Acero	7850	$210 \cdot 10^9$	0,3

Tabla 3.2: Propiedades de los metales

Todos los elementos del conjunto son tridimensionales y hexaédricos, por lo que para éstos únicamente es necesario crear una sección tipo *SOLID que ofrece el programa.

En cuanto a las propiedades de la gelatina se refiere, es necesario volver a recalcar que la simulación que se está realizando es del ensayo experimental explicado en el apartado anterior, y no del ensayo real que se hace al motor o a una parte del avión directamente, lo cual descarta una gran cantidad de artículos que detallan el comportamiento del pájaro en estas circunstancias.

La mayoría de artículos diferencian el comportamiento de la gelatina balística en función del ensayo para el cual es utilizada. Como en D. S. Cronin et al. [12] donde explica como en ensayos de baja velocidad de deformación habría que modelar la gelatina con un modelo cuasi-linear viscoelástico y para altas, como un material hiperelástico. Como el ensayo tratado es de alta velocidad, hubiese sido necesario sacar puntos de una gráfica que proporcionan.

YaokeWen et al. [13] explican cómo se podría definir la gelatina en un programa de EF como LS-DYNA. En este caso, el material sería *ELASTIC_PLASTIC con:

- $E = 850 \text{ kPa}$
- $E_t = 10 \text{ kPa}$
- $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$
- $\sigma_0 = 220 \text{ kPa}$

Siguiendo el criterio de Von Mises para la plastificación y una ecuación de estado polinomial del tipo: $P = C_0 + C_1 \cdot \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3$ con:

- $C_0 = 0 \text{ Pa}$
- $C_1 = 2.38 \text{ GPa}$
- $C_2 = 7.14 \text{ GPa}$
- $C_3 = 11.9 \text{ GPa}$

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

Aunque la simulación se aproxima a la que se realiza en este trabajo, el documento se descarta por ser una esfera metálica la que impacta contra la gelatina en vez de la gelatina contra una placa rígida.

Finalmente, se reproduce la gelatina como lo hace Nagaraj V and Velmurugan T. [14] documento que: "deals with application of explicit finite element analysis in order to predict the bird-strike induced impact damage on fuselage part of typical transport aircraft". (texto extraído del abstract) lo que significa que 'utiliza un programa de EF para predecir el daño de un bird strike provocado en el fuselaje de un avión comercial típico'. Este es exactamente el ensayo que se realiza en el parque tecnológico de la UC3m.

En este documento referencian al estudio de Willbeck [9] y a partir de ahí, proporciona una definición del material para simular el impacto de un pájaro en un programa de resolución por MEF. Como dan únicamente la densidad (ρ) y la viscosidad dinámica (μ) hay que definir el material como *NULL, con la ecuación de estado:

$$P = C_0 + C_1 \cdot \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \cdot \mu + C_6 \mu^2) \cdot U$$

Con U la energía
interna por unidad de
volumen

Los parámetros a introducir son:

- $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 0.001 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$
- $C_0 = 0 \text{ Pa}$
- $C_1 = 2250 \text{ MPa}$
- $C_2 = 0 \text{ Pa}$
- $C_3 = 0 \text{ Pa}$
- $C_4 = 0 \text{ Pa}$
- $C_5 = 0 \text{ pa}$
- $C_6 = 0 \text{ Pa}$

Sin embargo, como la densidad de la gelatina utilizada en el laboratorio es conocida, es preferible utilizar dicho valor (1000 kg/m^3).

Por consecuente, la masa total de la gelatina que estamos empleando es:

$$m = V \cdot \rho = \left(103,5 \cdot \pi \cdot 28,25^2 + \frac{4}{3} \pi \cdot 28,25^3 \right) \cdot 1000 = 353,9 \text{ g}$$

3.2.c Condiciones de contorno

Por último antes de lanzar las simulaciones, hay que imponer las condiciones de contorno e interacciones del conjunto. En este caso, como se explicará más adelante, la simulación no dura más de 4 ms, y en este breve espacio de tiempo lo único que

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

interesa es la deformación y tensión longitudinal del tubo. Por esta razón, no es necesario impedir ningún movimiento a las partes. El ensayo es lo suficientemente rápido como para pasar por alto el efecto de la gravedad, por lo que tampoco se representan los cables a los que está sujeto el tubo.

En lo que a los contactos se refiere, se ha obviado la rosca por simplicidad. En este caso, para representar las condiciones de contorno es necesario imponer la el contacto *TIED_SURFACE_TO_SURFACE. Como ninguna de las partes es plana y las circunferencias se solapan y apenas tienen puntos en común tal y como se muestra en la Figura 3.8, no se debe seleccionar el contacto entre partes como se haría en otros casos, si no crear lo que el programa denomina *SET_SEGMENT. Este comando utiliza las superficies planas de los elementos seleccionados (Figura 3.10) y permite que el contacto sea entre elementos enfrentados y no del conjunto de nodos.

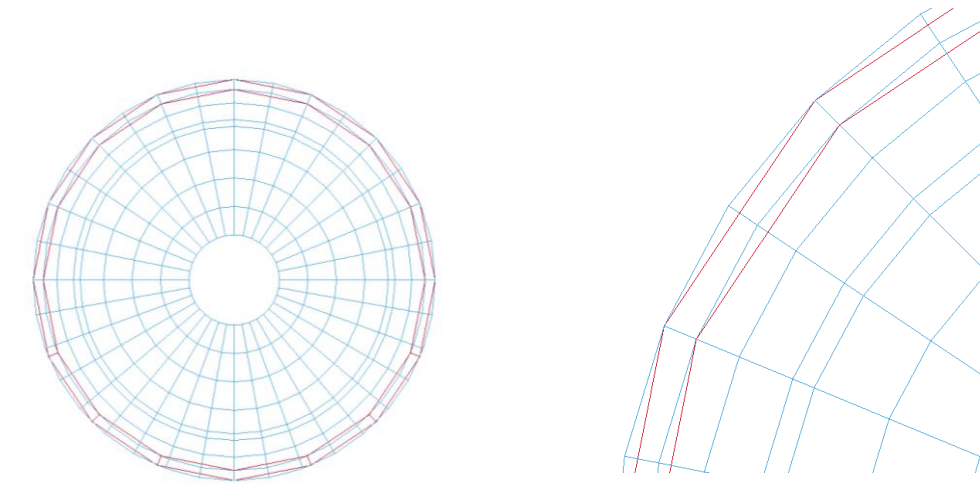


Figura 3.9: Unión entre el tubo y el tapón mallados y vista de detalle

*La parte roja representa el tubo y la azul el tapón.

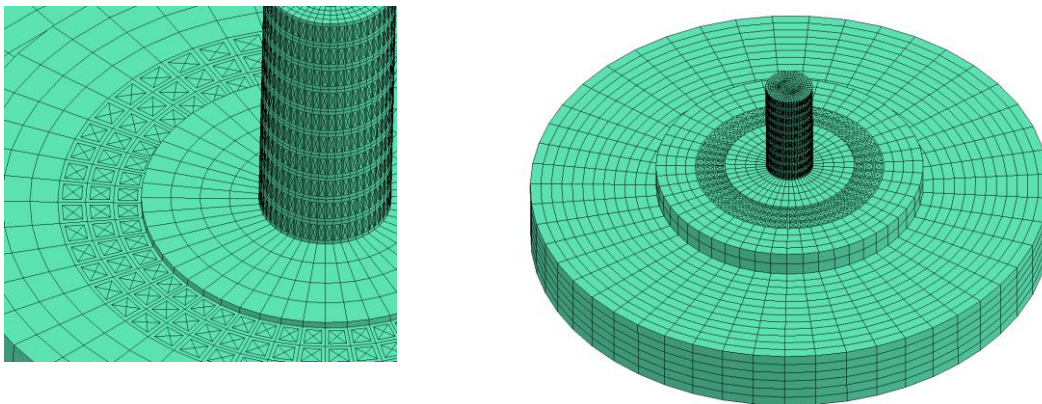


Figura 3.10: Set_Segm en la sufridera y vista de detalle de las zonas seleccionadas

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO DE GELATINA

Prestando especial atención a los elementos que se seleccionan y al comando *CONTROL, se puede conseguir que los contactos entre las partes que componen el conjunto del tubo funcionen correctamente. Manejando este comando el programa permite penetraciones iniciales si las hubiera y que no se proyecten elementos para hacer contacto con la parte 'Master'.

El otro contacto que hay en la simulación es entre la gelatina y la cara contra la que impacta. Este es mucho más directo, puesto basta con imponer *AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE y seleccionar las piezas, desempeña correctamente su cometido (se seleccionan los nodos por utilizar el método de SPH que más adelante se explica).

Otra condición de contorno impuesta es la velocidad de la gelatina, la cual se crea con el comando *INITIAL_VELOCITY_GENERATION y se designa el valor deseado en lo que es la dirección longitudinal al tubo. En este caso, Z.

Por otro lado, se debe colocar lo que imite a las bandas extensiométricas. Aunque en el ensayo real hay que colocar otra pieza más, en la simulación basta con pedirle al programa que guarde cada cierto tiempo (10 μ s) lo que analiza de uno de los elementos. Cuatro bandas más de las reales se colocan en el tubo a fin de reducir el número de simulaciones y obtener más resultados a la hora de variar parámetros. Estas cuatro están situadas por pares a las mismas alturas longitudinales pero en el eje perpendicular al suelo (Y).

Además, para obtener la fuerza de impacto de la gelatina con la sufridera: un *SET_SOLID que abarque toda la superficie de impacto de la pieza metálica y guarde los resultados de la fuerza a lo largo del tiempo (cada 10 μ s) de cada uno de los elementos.

Por último, con el cálculo de propagación de ondas, se prevé cuánto tiempo tiene que durar la simulación para abarcar la onda (ida y vuelta):

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Con:} \quad \begin{array}{l} E = 71 \text{ GPa} \\ \rho = 2500 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3} \end{array}$$
$$= 5329 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La onda se propaga a 5329 m/s y por tanto tarda 1,13 ms en cruzar todo el tubo y 2,3 ms en volver. La simulación dura entonces 4 ms para dejar cierto margen.

3.2.d Posibles problemas y soluciones aportadas

Como ya se ha dicho alguna vez, la gelatina se comporta como un fluido a altas velocidades, y con los ensayos experimentales se observa que toda la parte se va a deformar cuantiosamente. En el caso de una malla lagrangiana, si esto ocurriese los elementos sufrirían una distorsión y podría producirse una excesiva rigidez, un volumen negativo del elemento o la ausencia de biyectividad en el mapeo al sistema de coordenadas naturales.

Para evitar este problema y consultando un trabajo de investigación de J.A. Artero [15] se recurre al método denominado “Hidrodinámica Suavizada de Partículas” o por sus siglas en inglés SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) que consiste en eliminar la malla y definir cada elemento como un punto, no necesariamente unido a los demás (a diferencia con la malla) y que permite una mucho mayor deformabilidad. Cada partícula tiene una masa y unas propiedades.

Finalmente, el problema del tiempo computacional se mejora creando con la función *Box un rectángulo a partir del cual, si una partícula de la gelatina se sale de ahí, deja de intervenir en los cálculos. Esto ayuda a disminuir casi a la mitad el tiempo de simulación.

Una vez que los parámetros son adecuados, se puede comenzar el estudio comparativo entre el modelado numérico y los resultados experimentales.

Esta página está en blanco de manera intencionada

Capítulo 4

RESULTADOS OBTENIDOS

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez se tiene el conjunto listo con todo lo necesario, se pasa a lo que es realmente el cuerpo del trabajo. Este capítulo tiene como objetivo proporcionar y explicar los resultados obtenidos a lo largo de las simulaciones lanzadas.

Para alcanzar esta meta, se ha dividido en dos partes. La primera, la validación del conjunto del tubo, que a continuación se explica y se razona su necesidad. Seguidamente, la simulación del ensayo a distintas velocidades para validar el impacto y poder más adelante, hacer un estudio paramétrico.

4.1 Validación del conjunto

La validación del conjunto consiste en comprobar si su comportamiento estructural es el mismo que el real. Para ello, se comparan las frecuencias modales longitudinales medias en un ensayo de caracterización.

4.1.a Por qué y cómo un análisis de frecuencias

El ensayo que se quiere simular es el de un impacto contra una placa de acero que transmite una onda de tensión. Esta onda, tiene una amplitud, y por tanto una frecuencia. El conocimiento de las frecuencias propias busca saber si la onda que se le transmite a tubo podría en algún caso interferir con estas frecuencias propias y por tanto cuestionar la validez de los datos obtenidos.

Las frecuencias modales dependen únicamente de la geometría y material del conjunto. Por ello únicamente es necesario el conjunto y sus condiciones de contorno dejando la gelatina fuera de esta simulación

Las frecuencias proporcionadas del ensayo experimental son:

Modo	Frecuencia (Hz)
I	164
II	470
III	838
IV	1220
V	1620
VI	2020

Figura 4.1: Modos y frecuencias propias experimentales del conjunto

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Antes de lanzar la simulación, hay que constatar que los modos propios experimentales son todos longitudinales ya que está diseñado para analizar los esfuerzos en esta dirección, mientras que el ensayo reproducido se proporciona todos. Por ello, si no se toman medidas al respecto, las frecuencias que se consiguen son las siguientes (excluyendo los seis primeros cuya frecuencia es 0 Hz coincidiendo con los grados de libertad):

- 6,99031 Hz
- 6,99035Hz
- 24,9196Hz
- 24,9197Hz
- 54,2286Hz
- 54,2297Hz
- 66,4457Hz
- 94,289Hz
- 94,2962Hz
- 144,207Hz
- 144,24Hz
- 179,022Hz
- 202,862Hz
- 202,92Hz

*Una representación de algunos de los modos propios más significativos vienen representados en el ANEXO 5.

El único de estos que nos interesa es el modo obtenido a los 179 Hz que como se muestra en la Figura 4.2 es longitudinal y corresponde al modo I con un 9% de error.

Para tratar el problema, la mejor solución es imponer algunas condiciones de contorno y restringir el intervalo en el que buscar modos propios. Esto evita tener que ampliar descomensuradamente el número de frecuencias a sacar por la simulación, pues según se va aumentando la frecuencia, van apareciendo más modos y sus simétricos.

Estas condiciones de contorno son:

- Un punto bloqueado en la cara de la sufridera para evitar las torsiones.
- Una línea de nodos en el tubo bloqueada para evitar las flexiones
- El punto central de la sufridera bloqueado para evitar rotaciones

Se restringe el modelo para que saque modos propios entre +/- 15% del resultado experimental.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

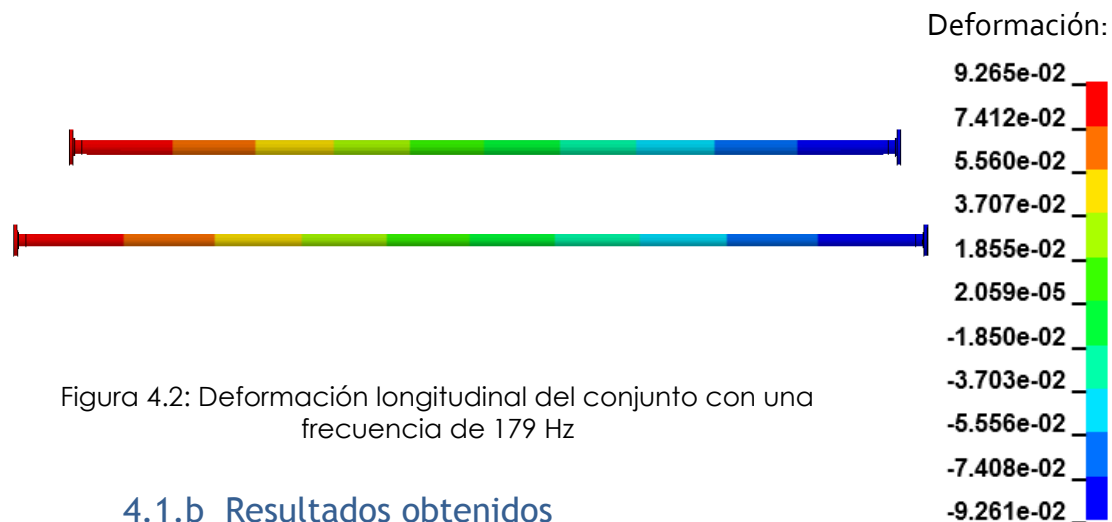


Figura 4.2: Deformación longitudinal del conjunto con una frecuencia de 179 Hz

4.1.b Resultados obtenidos

Con esta última aportación, se encuentran los modos propios longitudinales en las siguientes frecuencias y con el margen de error indicado:

Frecuencia Propia Real (Hz)	Frecuencia Propia de la Simulación (Hz)	Error (%)
164	180,18	9,8
470	517	11
838	931	11,1
1220	1365	11,2
1620	1804	11,1
2020	2244	11,1

Tabla 4.1: Comparativa de frecuencias modales entre el conjunto real y el numérico

Se puede percibir como todas las frecuencias propias obtenidas están en torno al 10% por encima del valor experimental. Al ser el margen de error pequeño y debido posiblemente a la complejidad de ensayar un tubo tan largo y las simplificaciones hechas, se puede dar por válido el conjunto con el que se está trabajando.

4.2 Validación del impacto

El siguiente punto es la validación del impacto, el cual consiste en analizar los resultados que se consiguen con la simulación y posteriormente compararlos con los experimentales que se obtienen en el laboratorio. Se compararán los datos de tensión a distintas velocidades y las fuerzas en el tubo.

4.2.a Resultados

Todos los resultados que se muestran a continuación son los que aporta el ensayo a velocidad 150 m/s para la gelatina, ya que son en los que mejor se distinguen las variaciones. Aun así, todas las observaciones son extrapolables al resto de ensayos.

El primero de los resultados que se pueden analizar es el impacto. Este consta de cuatro fases que se muestran en la Figura 4.3 y que MarinkoUgrčić et al. define [16].

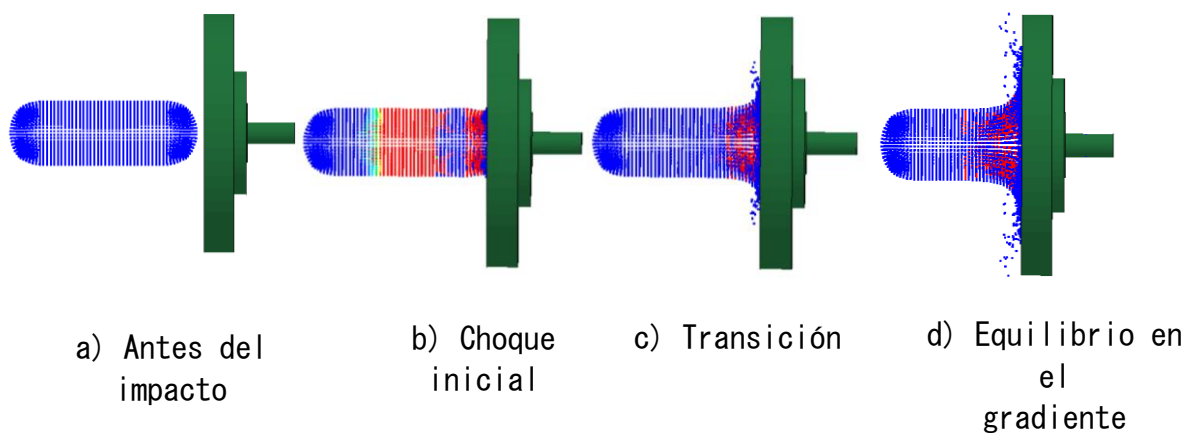


Figura 4.3: Diferentes etapas en el impacto hidrodinámico de la gelatina contra una placa rígida

Lo que él describe viene a decir:

- El fluido se acerca a la zona de impacto con una velocidad axial mientras que su presión interna es igual que la atmosférica.
- Los primeros puntos del fluido chocan contra la superficie rígida y son parados en seco, lo que provoca una onda que cruza toda la parte. La presión en la zona de choque aumenta cuantiosamente: "presión de Hugoniot".
- El fluido interior a alta presión comienza a disiparse hacia zonas de menor presión, el exterior, con el fin de reducir el gradiente. El fluido comienza a expandirse de forma radial.
- La última fase dura tanto como cantidad de flujo haya. Sigue existiendo un gradiente de presiones pero el fluido se disipa de forma homogénea. Las isobaras del fluido son fijas en el espacio y existe un equilibrio.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Cuando se ocultan parte de los nodos de la gelatina para analizar lo que sucede en el interior, cerca del punto de impacto, y cómo es el gradiente de presión, se localizan las isobaras que se alejan del centro hacia el exterior, donde la presión manométrica es nula.

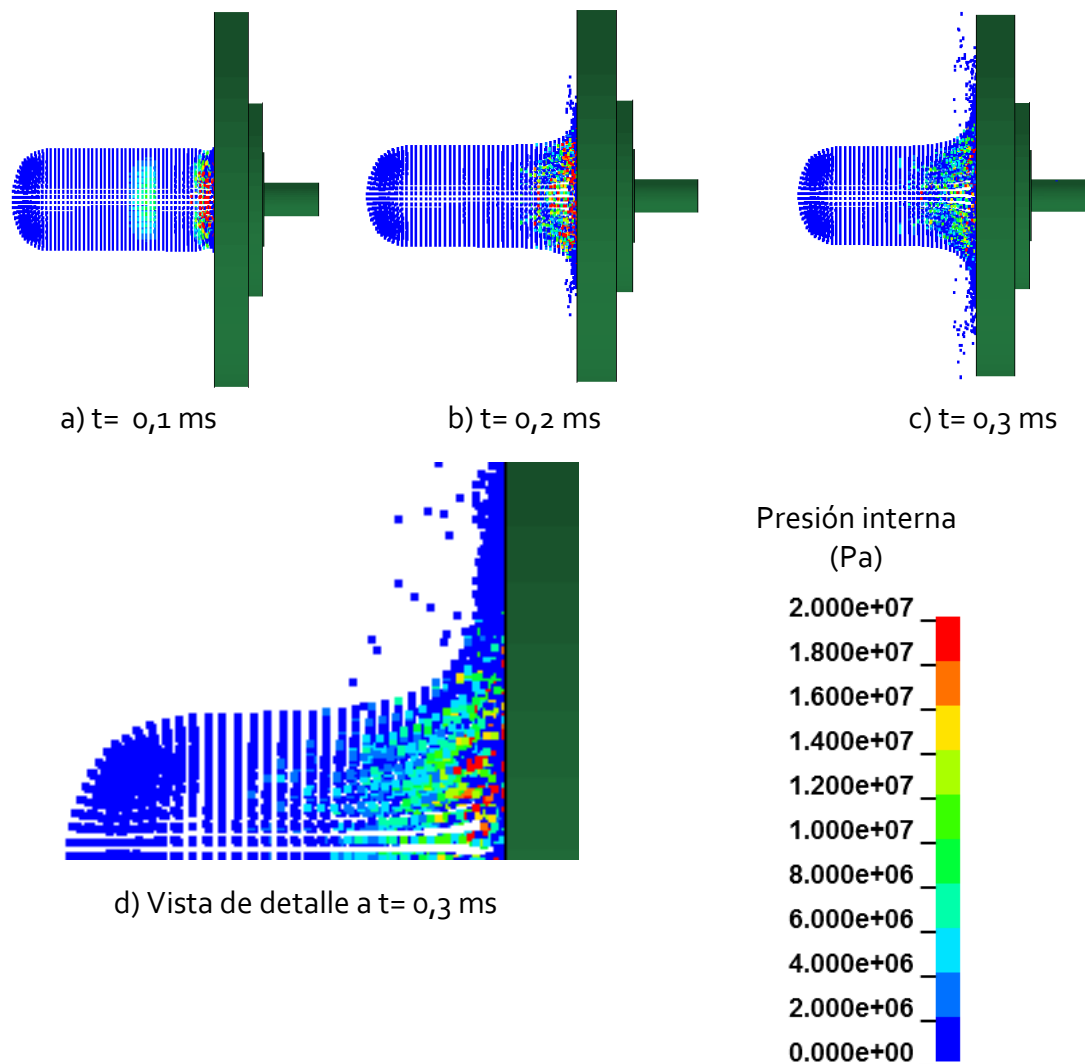


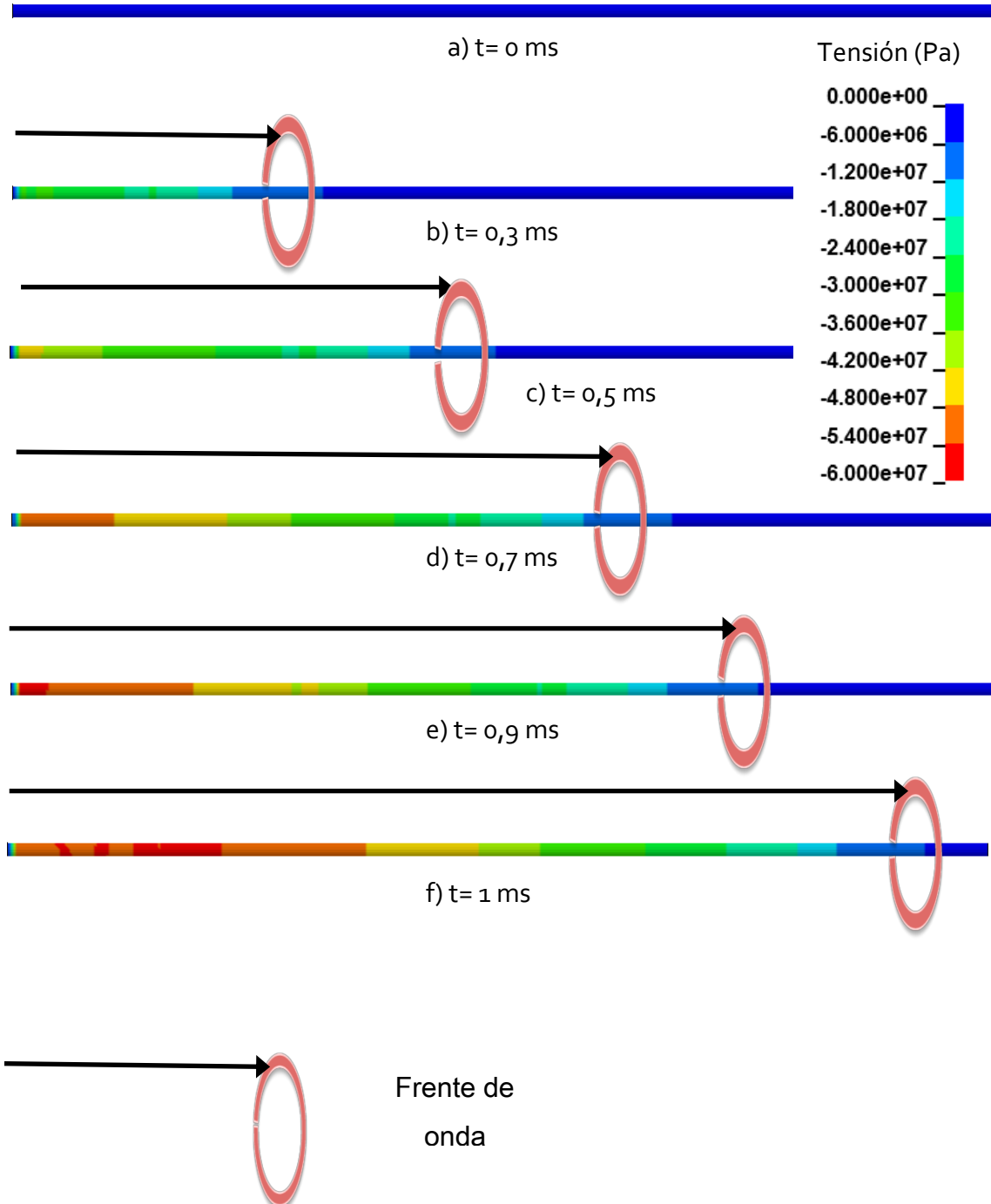
Figura 4.4: Presión en la sección interna de la gelatina durante los primeros instantes de choque

Al no tener otra posibilidad, las partículas toman dirección radial para nivelar la presión. En Figura 4.4 se pueden distinguir las líneas de corriente que hay a lo largo de la cuarta fase.

Desde el momento en que la gelatina toca la sufridera hasta que las partículas tienen únicamente velocidad radial, transcurren 1,1 ms. Sin embargo, a partir de 0,9 ms únicamente falta la semiesfera trasera de la gelatina.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

El siguiente resultado visible es la propagación de la onda como tal en el tubo. Fijando la escala para que sea más visible, en la Figura 4.5 se puede contemplar como un existe un avance de tensión progresivo a lo largo del tubo.



4. RESULTADOS OBTENIDOS

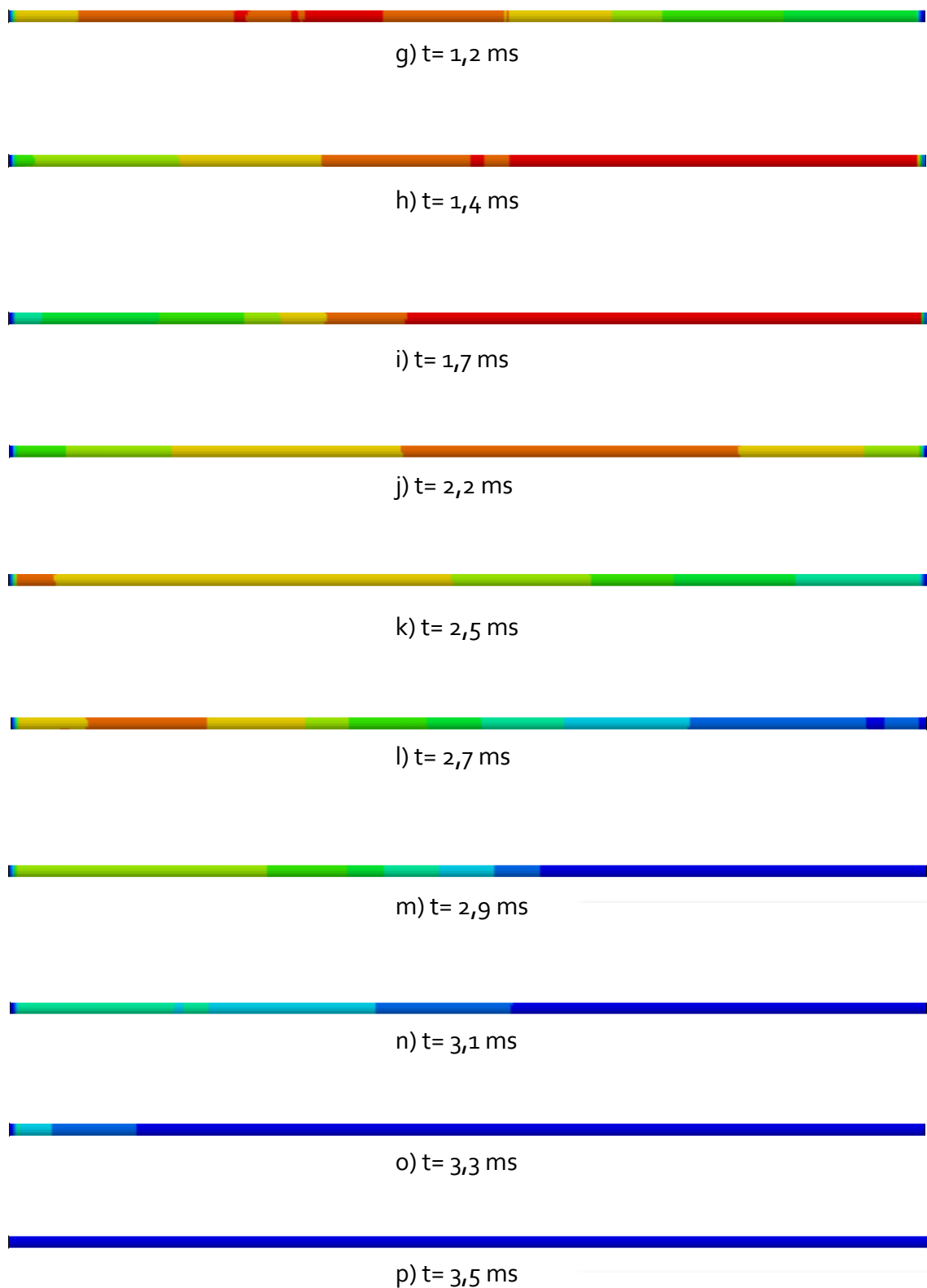
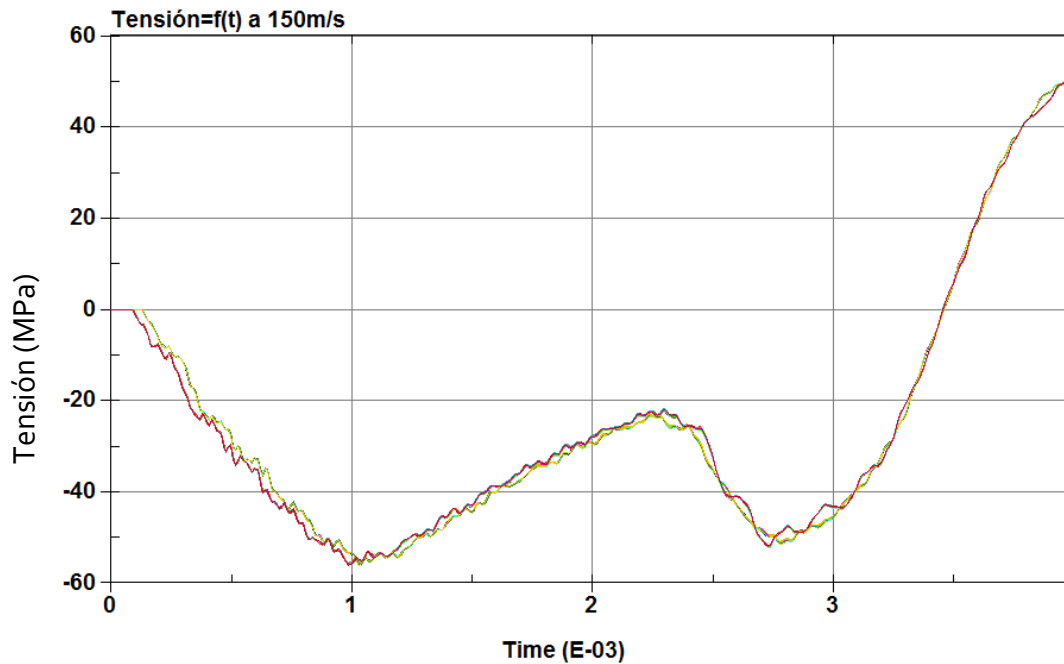


Figura 4.5: Secuencia de la propagación de onda

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Sabiendo que tensión negativa significa compresión, se puede ver como la onda es de compresión las dos veces que recorre el tubo. Esto es porque, en este caso a causa de los materiales utilizados, el cociente entre onda de intensidad y reflejada tienen el mismo signo.

Recordando que para la simulación se tomaban datos de tensión cada $10\ \mu\text{s}$ a 90 y 300 mm del comienzo del tubo, en la Gráfica 4.1 se muestran todos los valores recuperados para esta simulación.



Gráfica 4.1: Tensión numérica obtenida en las bandas del tubo a lo largo de la simulación

Aunque en la imagen no se pueda apreciar, hay en total ocho curvas, una por cada 'banda'. Existe únicamente un pequeño desfase lógico entre las que están a 90 y las de 300, pues a estas últimas la onda llega algo más tarde. Sin embargo, al ser resultados tan parecidos, no se harán diferencias más adelante.

En la gráfica se observa como existen dos mínimos locales, uno a 1 ms y otro a 2.7 ms, ambos con un valor de 50 MPa a compresión. El primer extremo pertenece a la onda de impacto, mientras que el segundo es la onda reflejada. Por ello, y esto también es válido para los resultados experimentales, el análisis se hace únicamente con el primero.

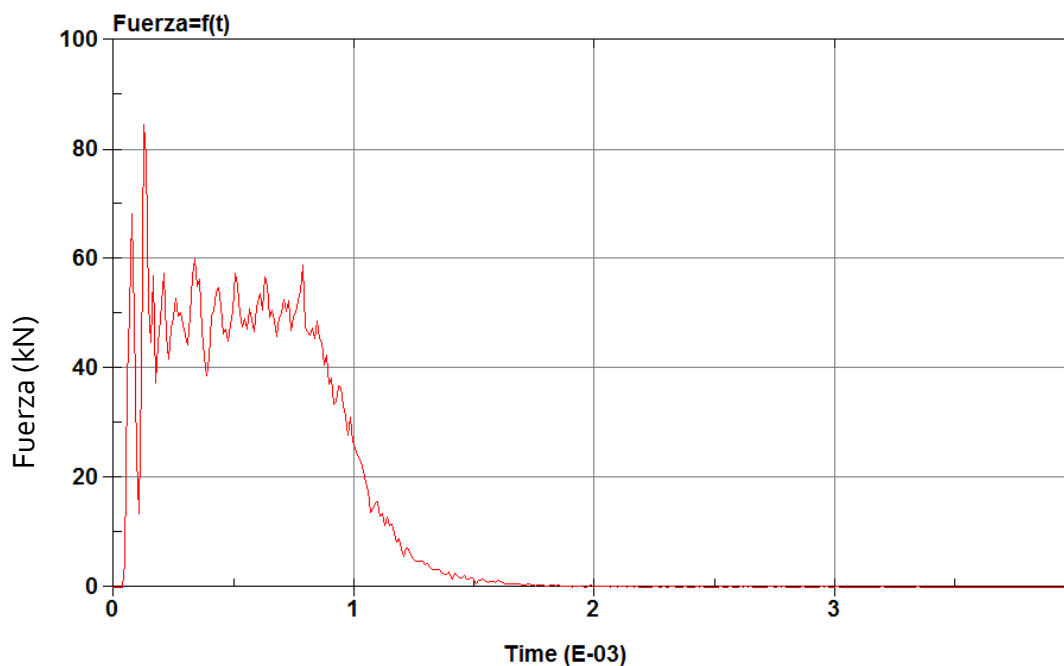
Finalmente en el análisis de fuerzas, gracias al documento .INTFOR que da el programa, se puede visualizar las que existen en la sufridera a lo largo del tiempo.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

La fuerza en Z se concentra principalmente en el centro de la sufridera y dura lo que el impacto. Si se suman todas las curvas de fuerza de cada uno de los elementos y se dibuja una sola, se obtiene la Gráfica 4.2.

En el perfil de la curva de Fuerza en Z se pueden observar lo que corresponde con las cuatro fases del impacto de la gelatina con la sufridera. Durante un primer pequeño intervalo de tiempo, la fuerza es 0, cuando obviamente la gelatina aún no ha contactado con la superficie rígida.

Justo después, el momento de máximo esfuerzo que ocurre mientras el fluido sufre el efecto Hugoniot que dura pocos instantes, hasta el momento en que llega la tercera fase, la transición. En este momento, tanto la fuerza en la sufridera como la presión en el fluido disminuyen hasta que llegan a un equilibrio entre el gradiente y la dispersión radial de material. Esta etapa se distingue en la gráfica por ser el intervalo de tiempo con una fuerza que tiende a constante. Finalmente, la bajada que significa que apenas quedan partículas chocando contra la placa (la semiesfera trasera) hasta llegar a 0, cuando ya únicamente su dirección es radial.



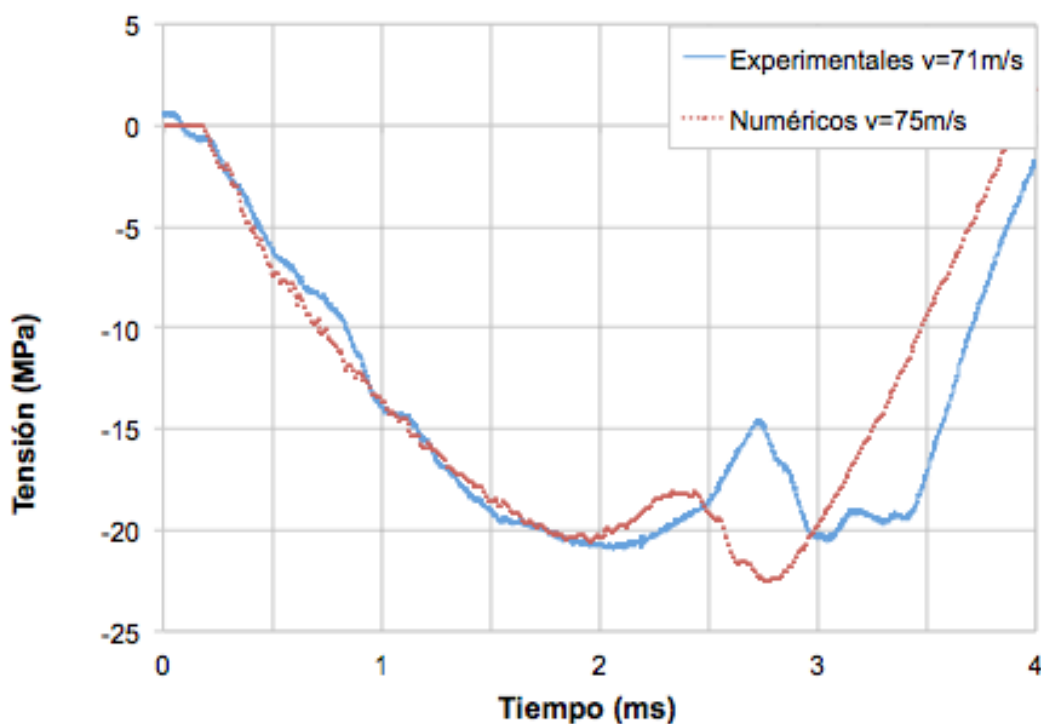
Gráfica 4.2: Fuerza numérica obtenida en la cara de impacto de la sufridera a lo largo de la simulación

4.2.b Comparativa

Para la comparación de los datos experimentales con los numéricos, se utilizarán gráficas que muestran ambos simultáneamente.

Hay que decir en este punto, que las curvas son de las bandas colocadas a los 300 mm, pues se ha visto que las que están a 90 mm no tienen mucho sentido en el ensayo experimental ya que la onda no está bien homogeneizada. La escogida para la simulación es la situada a la derecha del tubo si se mira de frente, aunque ya se ha dicho que es indiferente pues todas dan los mismos resultados para este tipo de ensayo.

Lo primero, la comparación de la tensión con el tiempo a distintas velocidades:

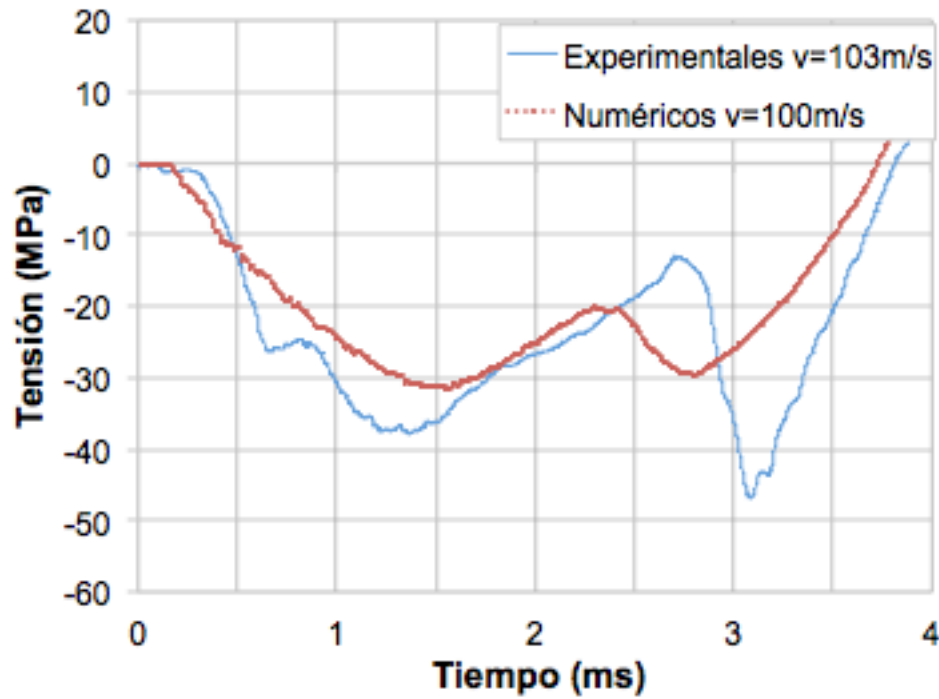


Gráfica 4.3: Tensión obtenida en las bandas a 71 y 75 m/s

En esta primera gráfica se constata que ambas curvas llegan a los 20 MPa de máxima tensión. Además, el crecimiento es muy similar en cuanto a tiempo en las dos. La diferencia se encuentra en la onda reflejada, pues en el ensayo numérico tarda menos en llegar.

Hay que destacar que la velocidad de la gelatina en el ensayo experimental es ligeramente inferior, 4 m/s, a la que se le da en la simulación. Esto, y que pesa diez gramos más, podría explicar el porqué de la pequeña variación de tiempo en el máximo.

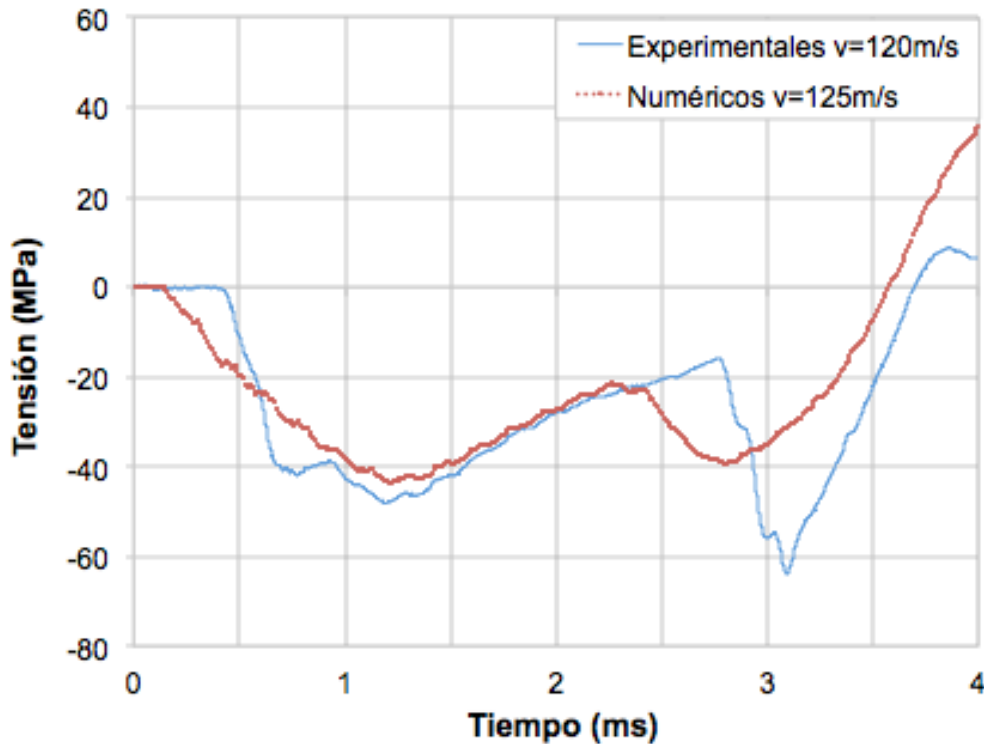
4. RESULTADOS OBTENIDOS



Gráfica 4.4: Tensión obtenida en las bandas a 103 y 100 m/s

En esta ocasión (Gráfica 4.4), es el ensayo experimental el que tiene una velocidad ligeramente mayor. Se puede apreciar como hay una diferencia de 5 MPa en la tensión máxima y que el periodo de la onda es distinto, pues la pendiente de bajada es bastante más pronunciada en los datos experimentales.

Por otro lado, igual que en la gráfica anterior, la onda reflejada llega antes en la simulación que en el experimento. Aquí la mayor semejanza se encuentra en la pendiente de disminución de tensión, la cual es muy similar entre ambas curvas.

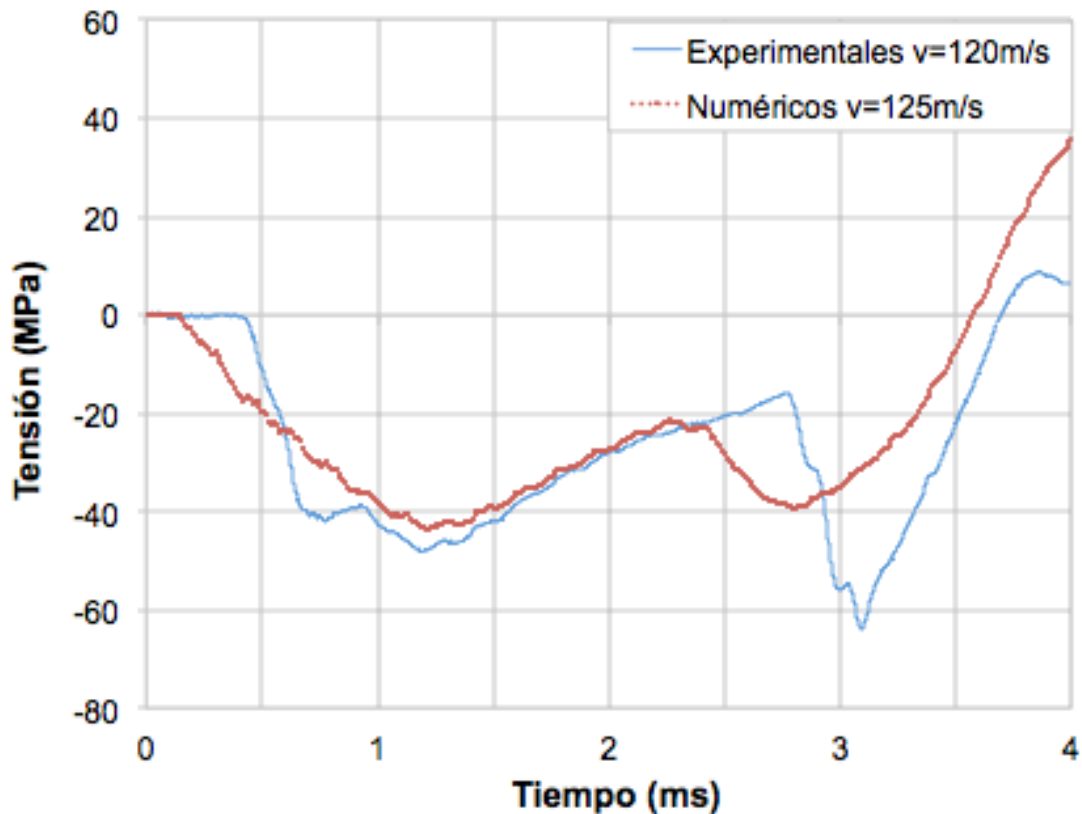


Gráfica 4.5: Tensión obtenida en las bandas a 120 y 125 m/s

Para la Gráfica 4.5 donde la diferencia de velocidades entre ensayos de 5 m/s, se puede apreciar como en la anterior, que la pendiente es mayor en el ensayo experimental. Además, el valor de la tensión máxima es ligeramente superior en la curva con menos velocidad, pero esto se puede explicar por la masa de la gelatina, la cual es de 362,9 g para este experimento, 10 g más que el conjunto de partículas.

Aun así, los resultados de esta gráfica son bastante satisfactorios pues la forma es muy similar y los periodos casi iguales, teniendo en cuenta que la curva experimental comienza su bajada 5 ms después.

4. RESULTADOS OBTENIDOS



Gráfica 4.6: Tensión obtenida en las bandas a 150 m/s

Finalmente, en la última gráfica comparativa de tensión con respecto al tiempo coinciden las velocidades, pero no el punto de máxima tensión, siendo el experimental casi 5 MPa mayor. En este caso, la masa del proyectil difiere en apenas 2 gramos, por lo que no se puede justificar la diferencia por este hecho.

Se puede observar que los datos numéricos tienen ciertas variaciones con respecto a los experimentales. La primera es el pico de tensión máxima que se alcanza. La otra, la pendiente de las curvas en el aumento o disminución de la tensión. En un primer instante, se puede asociar una variación de estos resultados a las desigualdades en la velocidad o la masa del proyectil.

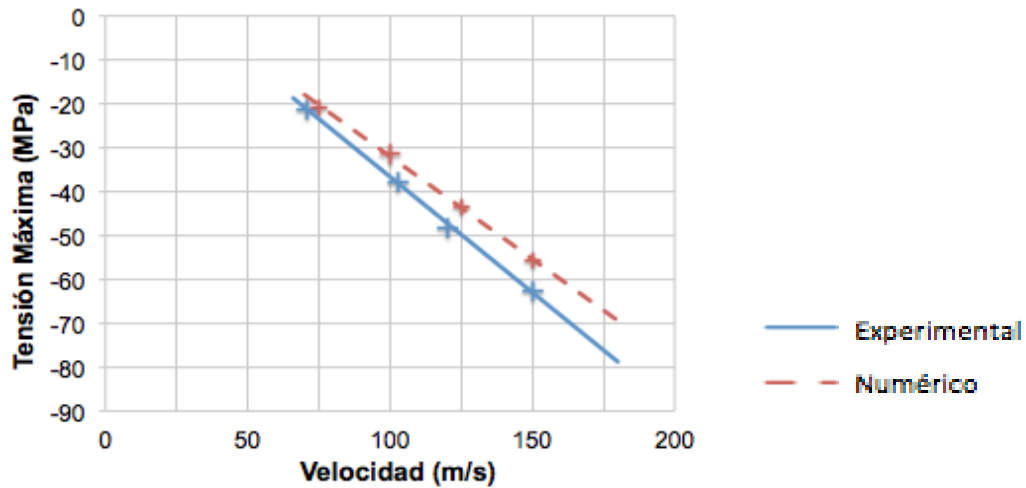
Para despejar estas diferencias, se crea la siguiente tabla:

4. RESULTADOS OBTENIDOS

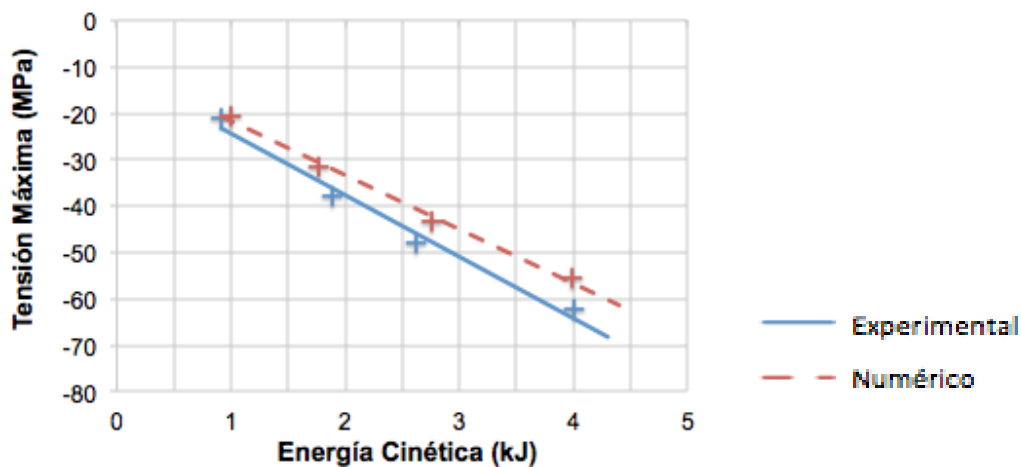
Velocidad Experimental (m/s)	Velocidad Numérica (m/s)	Masa (g)	Energía Cinética (kJ)	Tensión Máxima (MPa)
71		362,6	0,9139	-21,0
	75	353,9	0,9953	-20,6
	100	353,9	1,7695	-31,4
103		355,6	1,8862	-37,9
120		362,9	2,6128	-48,1
	125	353,9	2,7648	-43,4
150		355,5	3,9993	-62,4
	150	353,9	3,9814	-55,6

Tabla 4.2: Comparativa de los resultados de tensión obtenidos en función de la velocidad, la masa y la energía cinética

Introduciendo los datos para verlo gráficamente:



Gráfica 4.7: Tensión máxima obtenida en función de la velocidad de cada ensayo



Gráfica 4.8: Tensión máxima obtenida en función de la energía cinética de cada ensayo

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Gracias a estas gráficas, se verifica que la tensión máxima que alcanza el tubo a la altura de las bandas es directamente proporcional a la velocidad.

Con estos resultados se puede ver más claramente como la diferencia no proviene únicamente de la velocidad o la energía cinética del proyectil, si no que tiene que haber otros factores que intervengan. Algún ejemplo de este tipo de factores podrían ser las pérdidas en el contacto entre la sufridera y el tapón (se recuerda que para la simulación se suprimió la rosca), la calidad de los materiales (imperfecciones en el tubo, pérdida de rigidez por fatiga...) y errores experimentales a causa de la dificultad para controlar la posición de impacto e inclinación de la gelatina.

Mirando las líneas de tendencia se puede también ver como la tensión extraída de los valores numéricos está siempre por encima de la experimental, lo cual es un problema sabiendo que la tensión es de compresión. Esto es verdad aun en el caso del ensayo a 120 m/s, donde la energía cinética en la simulación es mayor y aun así, la tensión máxima de compresión es inferior. Es un problema ya que siempre se obtendrá una tensión mayor de lo esperado lo cual implica una disminución del coeficiente de seguridad.

Concluyendo, aunque la diferencia entre las tensiones máximas va aumentando con la velocidad, el error cometido es de alrededor un 10%, lo cual es asumible. Esto, y que los perfiles se superponen en por lo menos una de las pendientes de la onda de intensidad, determina que se puede validar el impacto.

4.2.c Fuerza de impacto

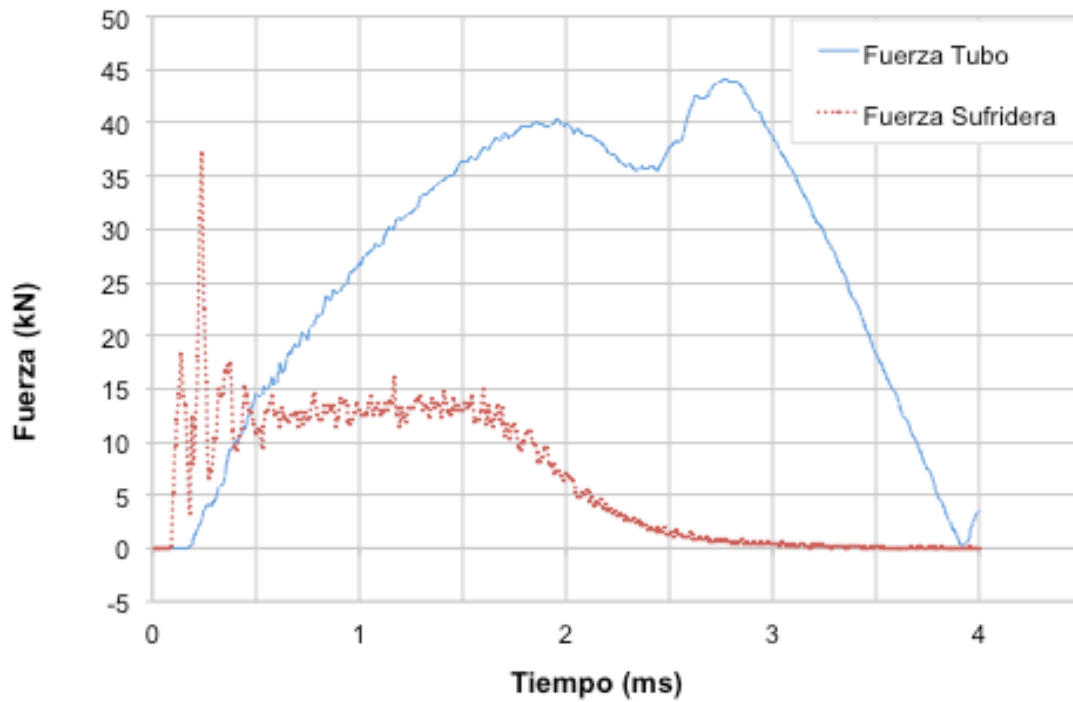
El último punto a comparar en la simulación es la fuerza de impacto. Durante el ensayo experimental se puede calcular la fuerza que se transmite al tubo, pues se conoce la deformación y el área. Sin embargo, lo que no se puede medir es la fuerza con la que la gelatina impacta realmente.

Como ya se dijo en las condiciones de contorno, en la simulación basta con pedirle al programa que saque la fuerza en el eje longitudinal en todos los elementos de la superficie de contacto. En el apartado anterior ya se mostró una gráfica del perfil que se obtiene.

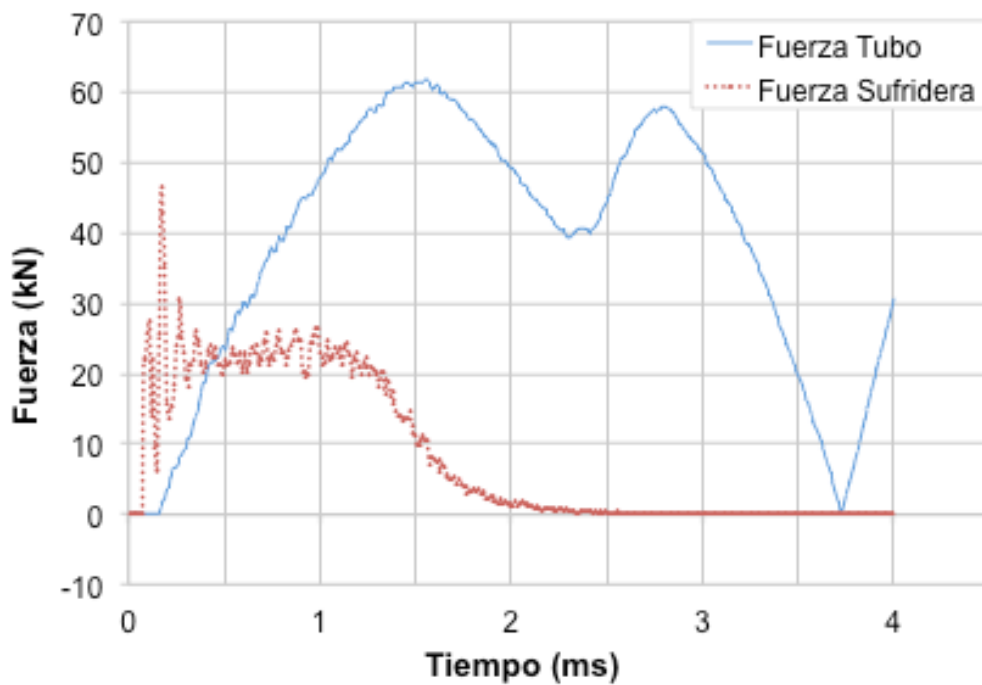
No tiene sentido comparar la fuerza medida en el tubo experimentalmente con la numérica, pues lo único que hay que hacer es multiplicar esta por el área, la cual es igual en ambos casos. La comparación que se va a hacer es entre la fuerza en el tubo y en la cara de la sufridera a distintas velocidades.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para que tenga igual signo, coge el valor absoluto de ambas, aunque la de la superficie ya sea positiva.



Gráfica 4.9: Comparación de la fuerza resultante en la cara de la sufridera a 100 m/s

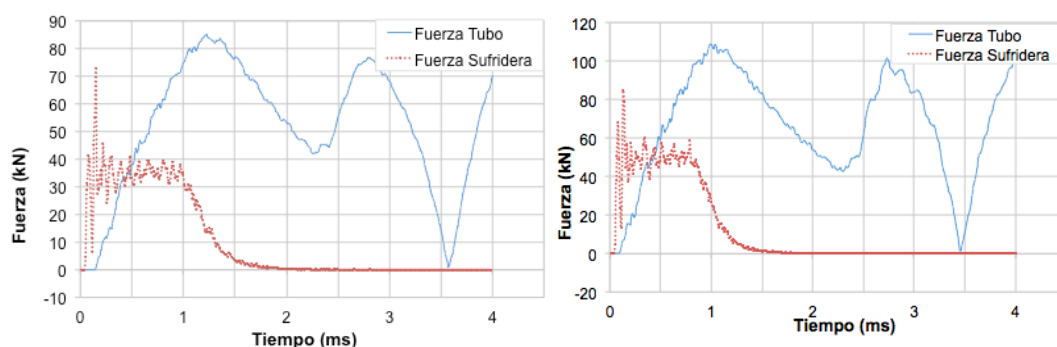


Gráfica 4.10: Comparación de la fuerza resultante en la cara de la sufridera a 70 m/s

4. RESULTADOS OBTENIDOS

De esta comparativa en las gráficas se pueden sacar varias observaciones:

- La primera, que la fuerza máxima en el tubo siempre es ligeramente superior a la del contacto.
- El crecimiento de onda dura lo que el impacto de la gelatina. Justo en el momento en que deja de haber partículas con velocidad longitudinal, la amplitud comienza a disminuir.
- Por consecuente, y visualizando el momento de fuerza máxima, este se va adelantando según se aumenta la velocidad de la gelatina, pasando de 2 ms a 1 ms en la última simulación.



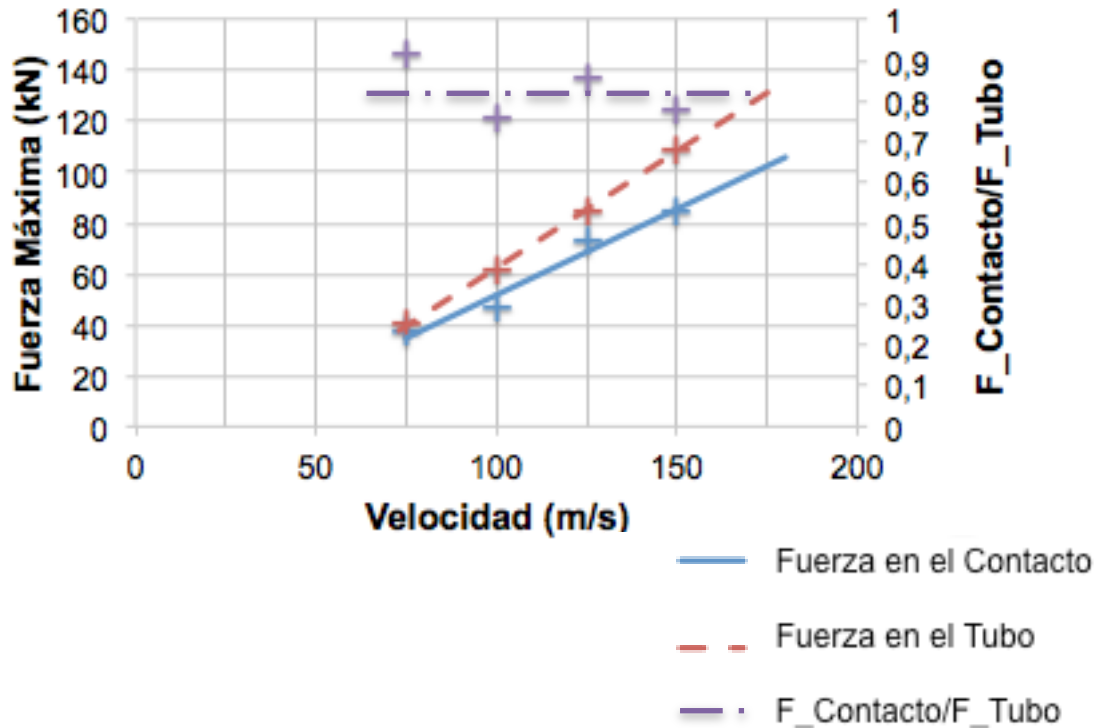
Gráfica 4.11: Comparación de la fuerza resultante en la cara de la sufridera y en el tubo a 125 y 150 m/s

Resumiendo los datos en una tabla, tal y como se hizo en el apartado anterior:

Velocidad Experimental (m/s)	Velocidad Numérica (m/s)	Masa (g)	Fuerza Máxima en el Tubo (kN)	Fuerza Máxima en el Contacto (kN)
71		362,6	41,1000	
	75	353,9	40,3245	36,9600
	100	353,9	61,6000	46,6315
103		355,6	74,3000	
120		362,9	94,4000	
	125	353,9	85,1000	72,7971
150		355,5	122,0000	
	150	353,9	109,0000	84,6575

Tabla 4.3: Comparativa de las fuerzas obtenidas en función de la velocidad y la masa

Para visualizar la hipótesis que manifiesta que la fuerza en el tubo es siempre mayor que la del impacto, una opción es dividir la fuerza de contacto entre la del tubo, (Gráfica 4.12) pues así se sabrá si es proporcional o cumple alguna otra distribución. Parámetros de los que puede depender son la velocidad de impacto, las pérdidas por transmisión de onda u otros.



Gráfica 4.12: Comparativa de la evolución de la fuerza en el contacto y en el tubo con respecto a la velocidad

Aunque son pocos puntos para confirmar del todo la hipótesis, se observa en la gráfica una línea de tendencia constante, lo que implica que el aumento de la fuerza en la sufridera y el tubo no depende de la velocidad.

En este caso, no se conserva la fuerza como en un problema estático si no que se conserva el cociente entre ambas, y es del orden de 0,8.

El hecho de este aumento de fuerza se puede deber, pese a que el ratio de onda transmitida entre el acero y el aluminio es 0,52, a que la disminución brusca de sección se sobrepone.

En este punto se puede sacar una conclusión que podría parecer obvia, pero que hasta este momento no se había demostrado. La amplitud de la onda depende directamente de la fuerza de impacto, que a su vez, de la energía cinética como se declaró anteriormente en las Gráfica 4.7 y Gráfica 4.8. Como la relación entre la tensión en el tubo y la fuerza en el contacto es una constante y ahora conocida, siempre que se pueda medir la deformación en el ensayo experimental se podrá obtener la fuerza de impacto.

Esta página está en blanco de manera intencionada

Capítulo 5

ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

Una vez validado el modelo, lo que queda por hacer es plantear las posibles variaciones accidentales que se puedan producir a la hora del ensayo para averiguar cómo afectan a los resultados.

Para ello, se han aplicado tres tipos de variaciones en la simulación: cambio de coordenadas de impacto en el eje X, en el eje XY y en la inclinación de la gelatina. La velocidad escogida es siempre de 100 m/s en dirección Z, pues es la que más variación presenta con los datos numéricos y se busca encontrar una razón.

Todas las gráficas cuyos datos son repetitivos o no relevantes se adjuntan en el ANEXO 6.

5.1 Desplazamiento en X

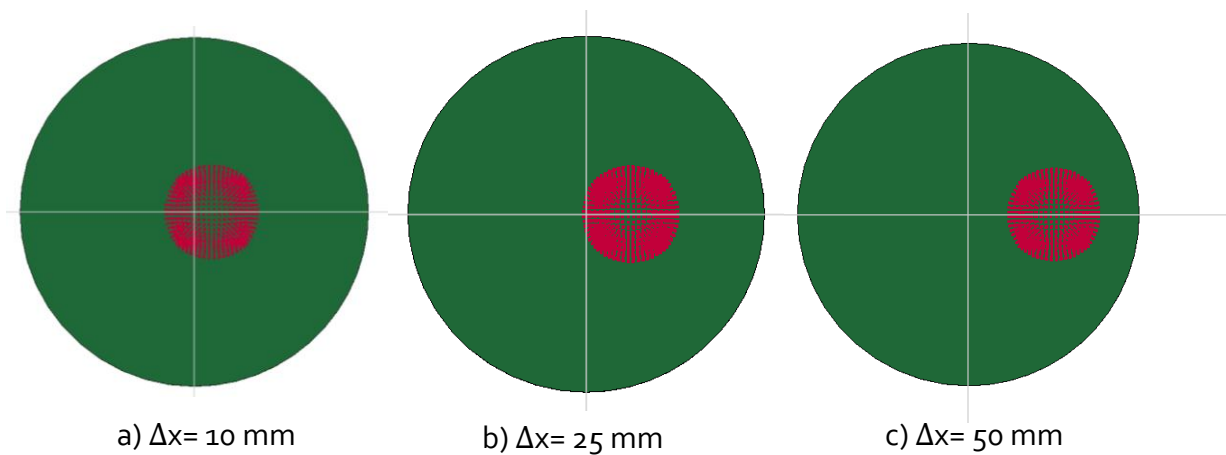
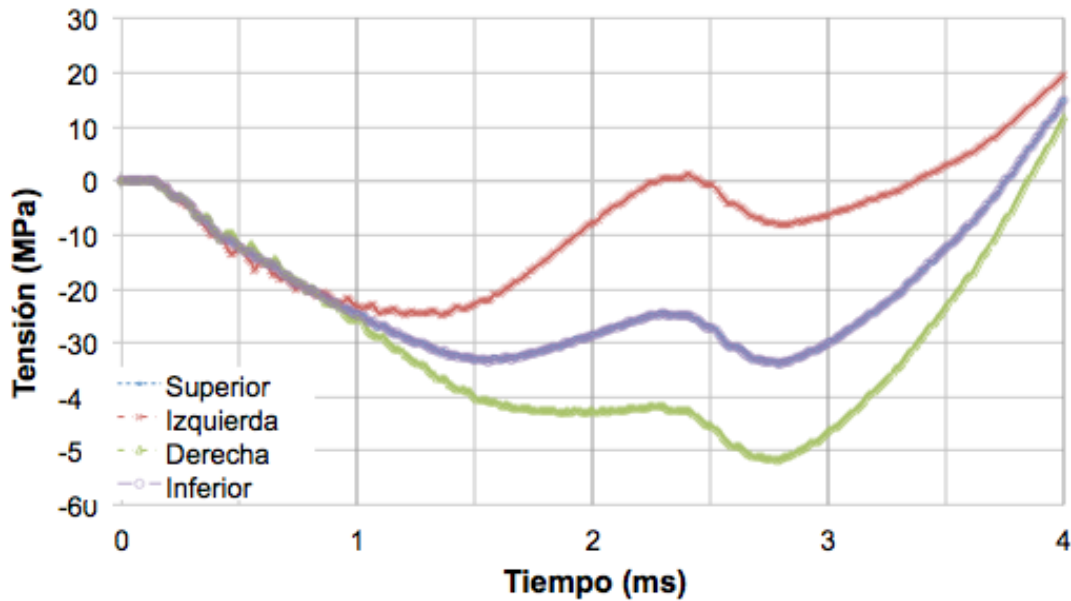


Figura 5.1: Desplazamiento progresivo en el eje X de la gelatina

Se realizan tres simulaciones aumentando progresivamente el desplazamiento. Se propone la hipótesis de que, dada la simetría, en esta ocasión el desplazamiento al ser en un único eje, no modificará los resultados de las bandas superior e inferior, si no solo las laterales.

En la Gráfica 5.1 se muestran todas las curvas de tensión en función del tiempo que se obtienen con las cuatro bandas.

Aunque se visualicen únicamente tres curvas, la central está compuesta por los datos de las bandas superior e inferior. Esta es exactamente igual que la que se encuentra en la Gráfica 4.1 del apartado anterior en la que se describe la onda cuando el impacto es central. Sin embargo, las bandas laterales sufren una alteración en los datos debido a los esfuerzos de flexión que provoca el no impactar en el centro. Como era de esperar, el esfuerzo de compresión aumenta en la banda derecha, mientras que disminuye en la de la izquierda.



Gráfica 5.1: Tensión obtenida en las bandas para un desplazamiento de 10 mm

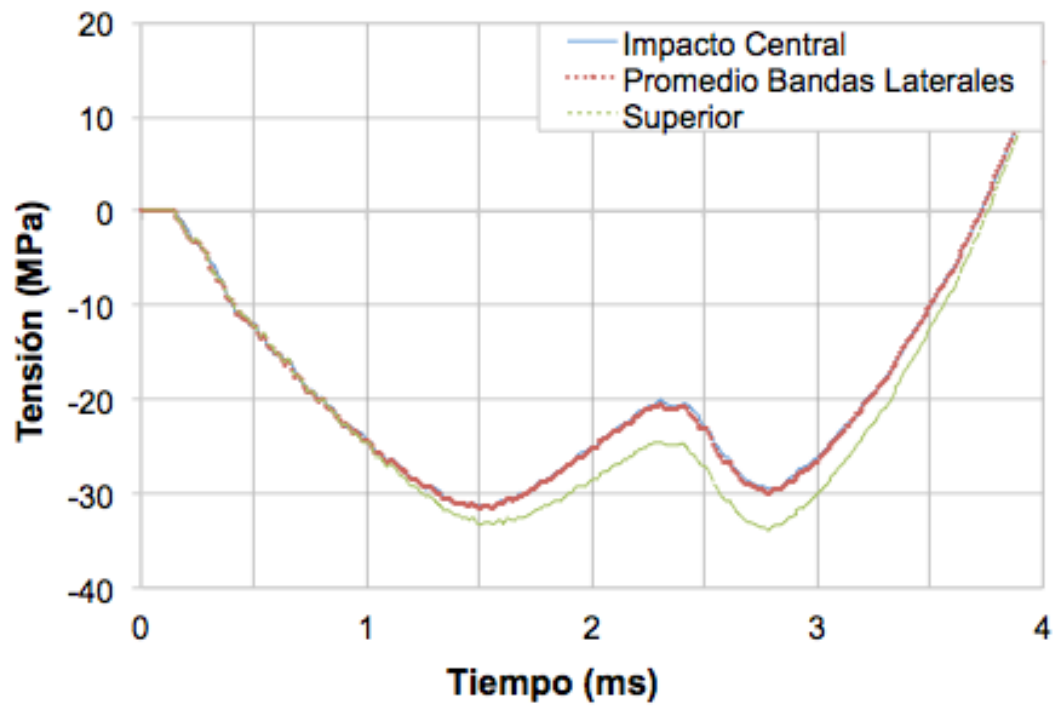
Para equilibrar este gradiente de tensión entre un extremo y otro, se hace la media entre ambas curvas, y se comparación la simulación sin alterar. Lo que se busca es equilibrar el aumento en un lado con la disminución en el otro. Se añade también los valores de la banda superior.

Aunque se distingue vagamente, la curva que marca la media entre los datos de las bandas laterales y la que se obtuvo anteriormente están totalmente solapadas, mientras que la superior está ligeramente por debajo. Hay que rechazar la hipótesis postulada al principio pues sí que existe una ligera variación en estas bandas que posiblemente, sea causa de las tracciones que aparecen en algunas partes del tubo.

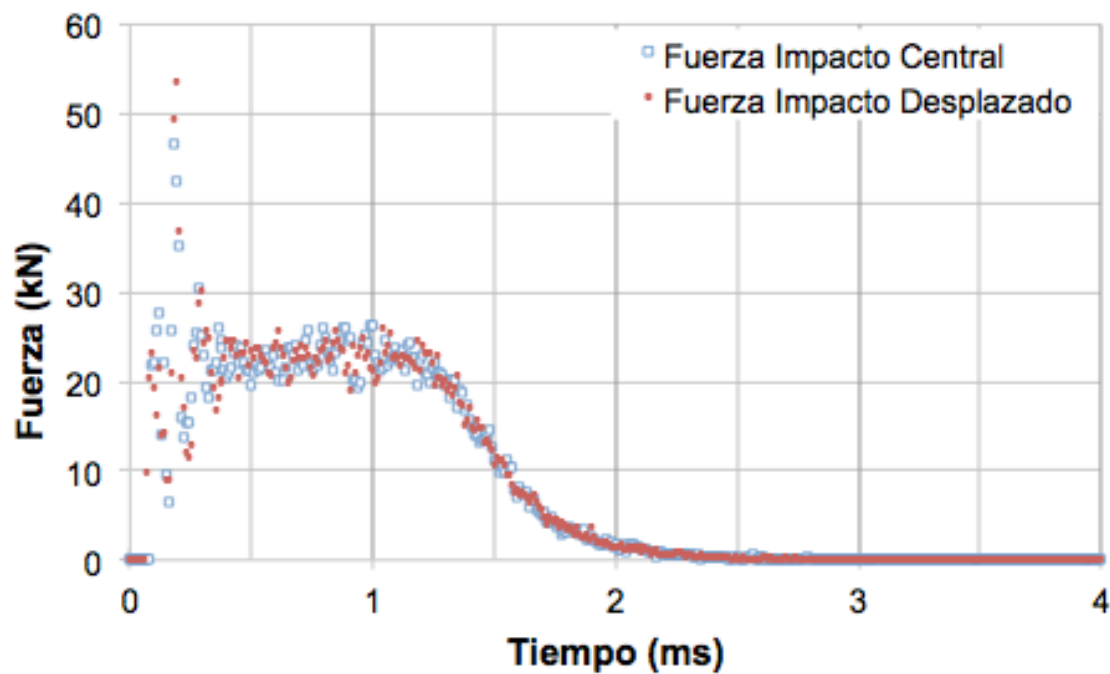
Por último, lo que queda a comparar es la fuerza de impacto (Gráfica 5.3). Una vez más sería absurdo comparar las fuerzas en el tubo pues se multiplican ambos resultados por la misma constante. Se destaca que ambos perfiles son idénticos, y aunque haya algunos puntos que difieren, se puede explicar sabiendo que el intervalo de datos no es lo suficientemente preciso para el pico de tensión que tienen ambas curvas.

Con esta simulación paramétrica se demuestra que una pequeña variación de 10 mm en el eje X no altera los resultados que se obtienen a la hora de realizar el ensayo. Tanto la fuerza, el periodo de la onda y su amplitud son idénticos si se trabaja con la media de los datos que proporcionan las bandas opuestas.

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO



Gráfica 5.2: Comparación del Promedio de la tensión de las bandas laterales y la superior con la original para un desplazamiento de 10 mm



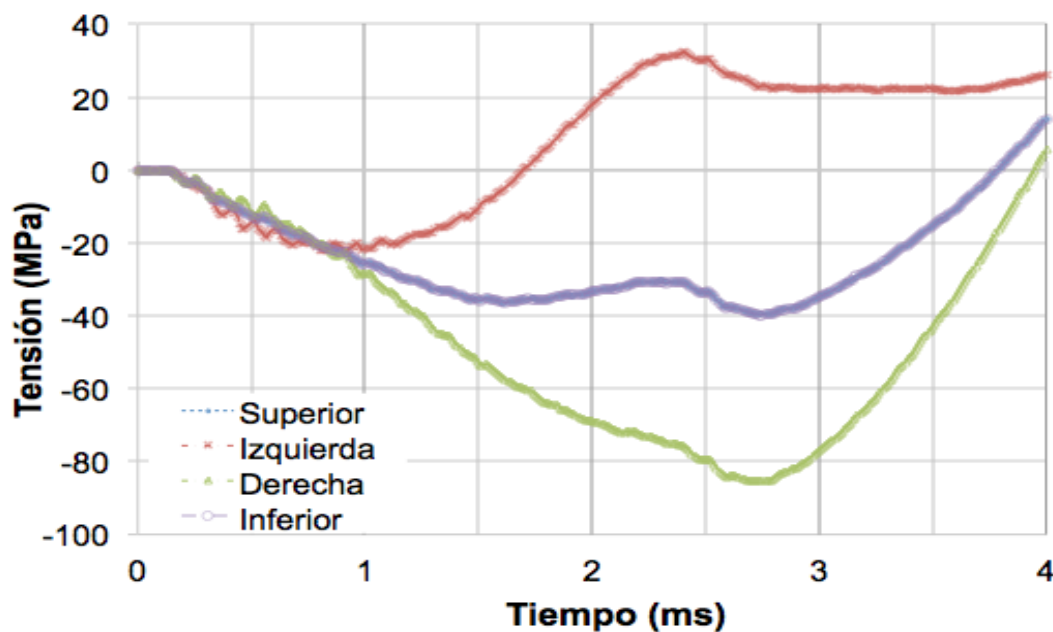
Gráfica 5.3: Comparación de la fuerza obtenida entre el análisis paramétrico y la original para un desplazamiento de 10 mm

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

A continuación se muestran los resultados correspondientes a la segunda alteración, es decir al desplazamiento de 25 mm en el eje X. Análogamente, se muestra primero la tensión que registran las cuatro bandas extensiométricas (Gráfica 5.4), posteriormente la media de las laterales junto con la primera a 100 m/s y la superior. Finalmente, se compara la fuerza de contacto en ambas simulaciones.

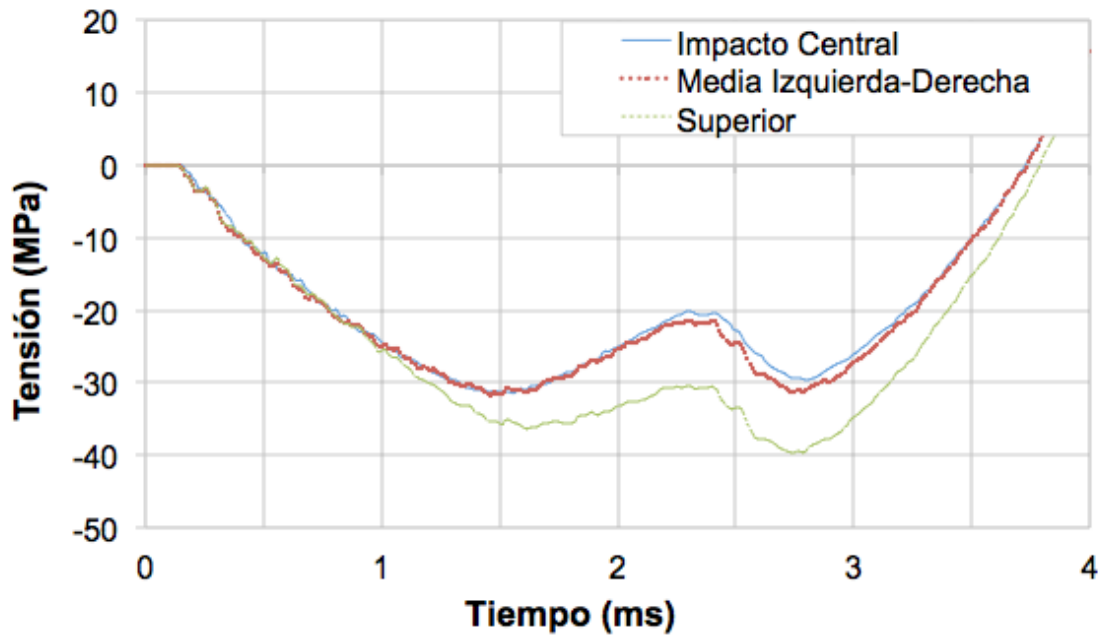
Con estas gráficas se pueden destacar varias diferencias con las previas. Lo primero, es la tensión máxima que registran las bandas superior e inferior, en las cuales se percibe de primeras una diferencia con la tensión inicial. Esto se demuestra en la comparación con los datos originales, donde la banda superior tiene una diferencia de 5 MPa más a compresión. Con esto ya queda demostrado que si tuviéramos únicamente dos bandas situadas en los laterales, como es el ensayo real, un desplazamiento en la dirección perpendicular nos daría unos datos ligeramente alterados.

Sin embargo, la media de las bandas Izquierda y Derecha sigue recubriendo completamente a la curva de los datos originales y el la fuerza de impacto en la superficie es idéntica (ANEXO 6),



Gráfica 5.4: Tensión obtenida en las bandas para un desplazamiento de 25 mm

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO



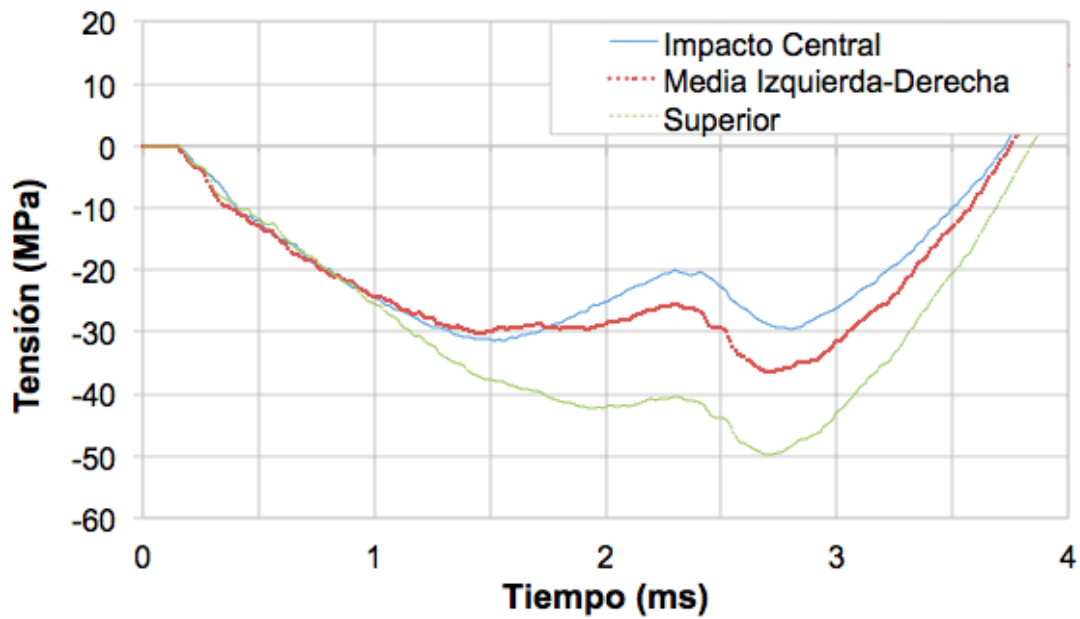
Gráfica 5.5: Comparación del promedio de la tensión en las bandas laterales y la superior con la original para un desplazamiento de 25 mm

Podemos concluir que en el caso de existir un desplazamiento de hasta 25 mm en la dirección en la que estén colocadas las bandas, los datos siguen siendo correctos y válidos, siempre y cuando se coja el promedio de ambos en la dirección perpendicular al desplazamiento.

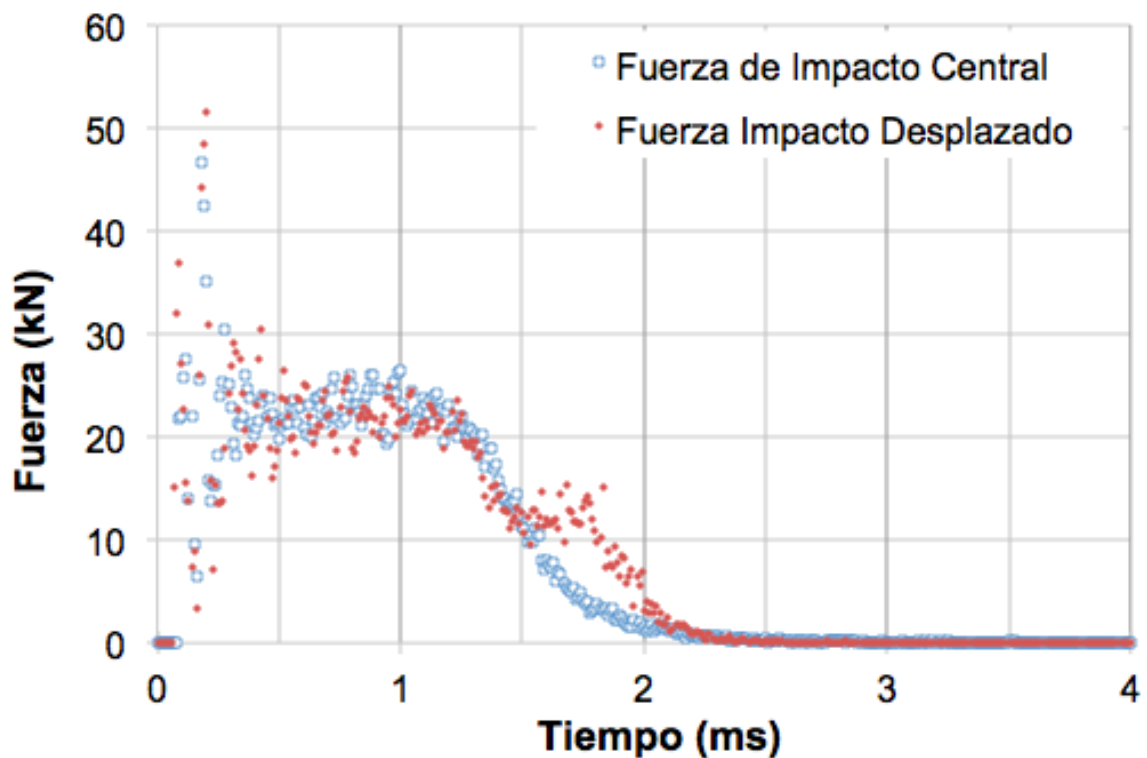
Para el último caso en que el desplazamiento es de 50 mm, tal y como se muestra en la Gráfica 5.6 ya no existe una superposición entre la media de las bandas laterales y la de los datos originales. Tampoco se distingue claramente un mínimo y la curva de la banda superior, que sigue superpuesta con la inferior, no define correctamente una onda y su tensión máxima es un 25% más grande.

En cuanto a la fuerza de impacto se refiere, también se concluye que los datos difieren bastante. En este estudio, existen dos intervalos de tiempo más breves en los que hay una fase 4 del impacto ($[0,5;1,25]$ U $[1,5;1,75]$) a distintas fuerzas críticas.

Como conclusión de este apartado se puede sacar que si existe un desvío de más de 25 mm con respecto al centro en cualquiera de los ejes, es necesario repetir el ensayo, mientras que si es inferior o igual, basta con coger el promedio de las bandas en la dirección perpendicular. En caso de que únicamente se tomen datos con dos galgas y haya un desplazamiento en el mismo plano, se estará cometiendo un error del 15%, lo cual está en el límite pero sigue siendo aceptable en algunos casos.



Gráfica 5.6: Comparación del promedio de la tensión en las bandas laterales y la superior con la original para un desplazamiento de 50 mm



Gráfica 5.7: Comparación de la fuerza obtenida entre en el análisis paramétrico y la original para un desplazamiento de 50 mm

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

5.2 Desplazamiento en XY

En este punto, igual que en el anterior, se realizan tres variaciones en la posición de impacto de la gelatina que se muestra a continuación. En este estudio se analizará qué sucede si el impacto se desvía al primer cuadrante formando 45° con los ejes y a una medida dada.

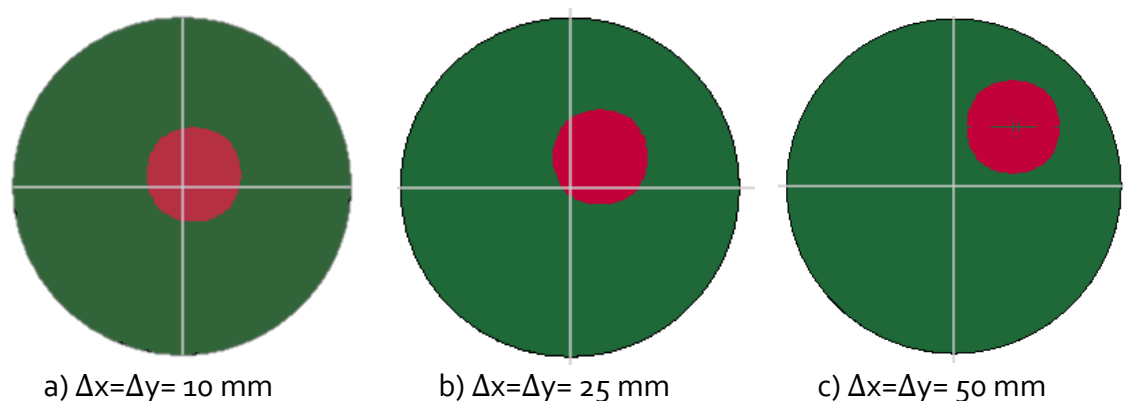


Figura 5.2: Desplazamiento progresivo en los ejes X e Y de la gelatina

En esta ocasión, se conjetura que serán necesarias las cuatro bandas para contrarrestar la sobretensión de unas con la subtensión de otras.

Para el primer estudio, se obtienen las tensiones máximas de cada una de las bandas y se representan en la Tabla 5.1.

Banda	Tensión Máxima (Mpa)
Impacto central	-31,4
Superior	-27,5
Derecha	-27,4
Izquierda	-40,5
Inferior	-40,6

Tabla 5.1: Tensión máxima obtenida en las bandas para un desplazamiento en X e Y de 10 mm

*La gráfica representando estos resultados se encuentra en el ANEXO 6.

Tal y como se había previsto, las bandas superior y derecha sufren en todo momento una tensión mayor de la del impacto central, mientras que, la inferior e izquierda, una tensión menor debido a los esfuerzos de flexión. Se considera que en este caso, al ser el impacto en un bisector de una cara circular genera exactamente los mismos esfuerzos en el eje X que en el eje Y. Esto no sería verdad si estuviera chocando

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

en un plano a 30° ó a 60°, pues en esos casos la multiplicación por el seno o coseno da distintos resultados.

$$\cos(45) = \text{sen}(45) = \frac{\sqrt{2}}{2}$$
$$\cos(30) \neq \text{sen}(30)$$

Se decide representar el promedio de las cuatro bandas junto con el promedio de las bandas laterales. El primero permite comprobar la hipótesis postulada anteriormente, mientras que el segundo sigue la línea del apartado anterior.

Se observa en la Gráfica 5.8 que la forma de ambas es muy similar, los máximos locales en el mismo periodo de tiempo, aunque la onda de intensidad no alcanza el mismo valor. La tensión máxima del promedio de las cuatro bandas es un 20% menor que los datos originales, por lo que no la hipótesis queda rechazada para este caso.

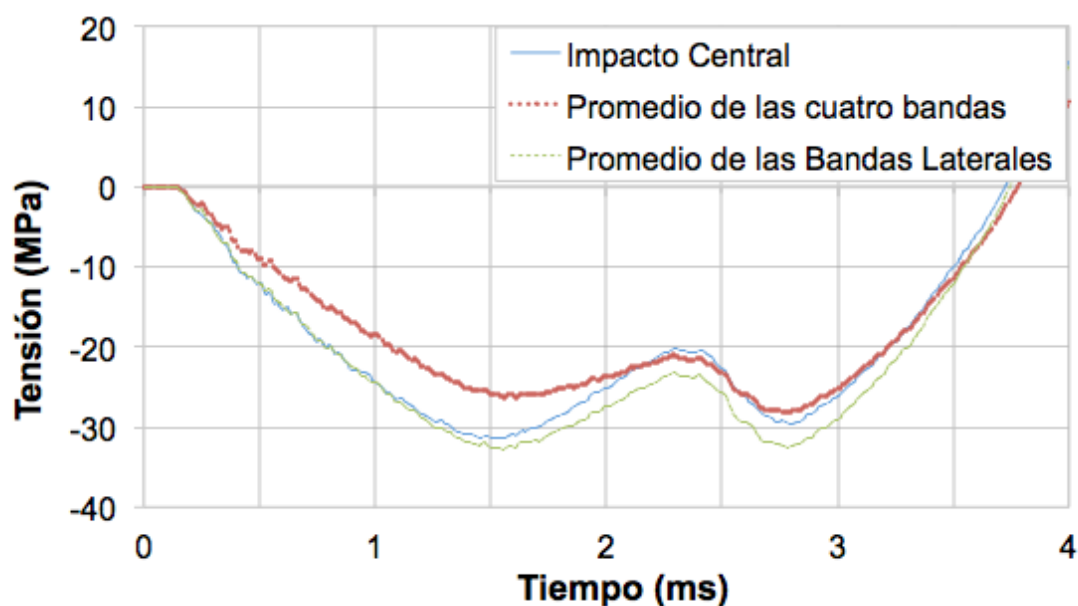
Por otro lado, el promedio de las bandas laterales se ajusta mucho más significativamente a la onda del impacto central. En esta ocasión se percibe perfectamente como los datos paramétricos se ajustan correctamente a los originales, y esta comparación es mucho más fiable que la anterior. Sería indiferente coger los laterales o la superior e inferior, pues se ha visto en la Tabla 5.1 que ambas bandas miden las mismas tensiones.

Esto se puede explicar porque a pesar de estar aplicando un momento en los ejes, se aplica el mismo pero con signo contrario en unas bandas opuestas, y se contrarrestan para dar el resultado correcto.

Aun así, en este caso existe ya existe una ligera diferencia debido a los cálculos trigonométricos que se aplican a las fuerzas por no estar alineadas en ninguno de los ejes.

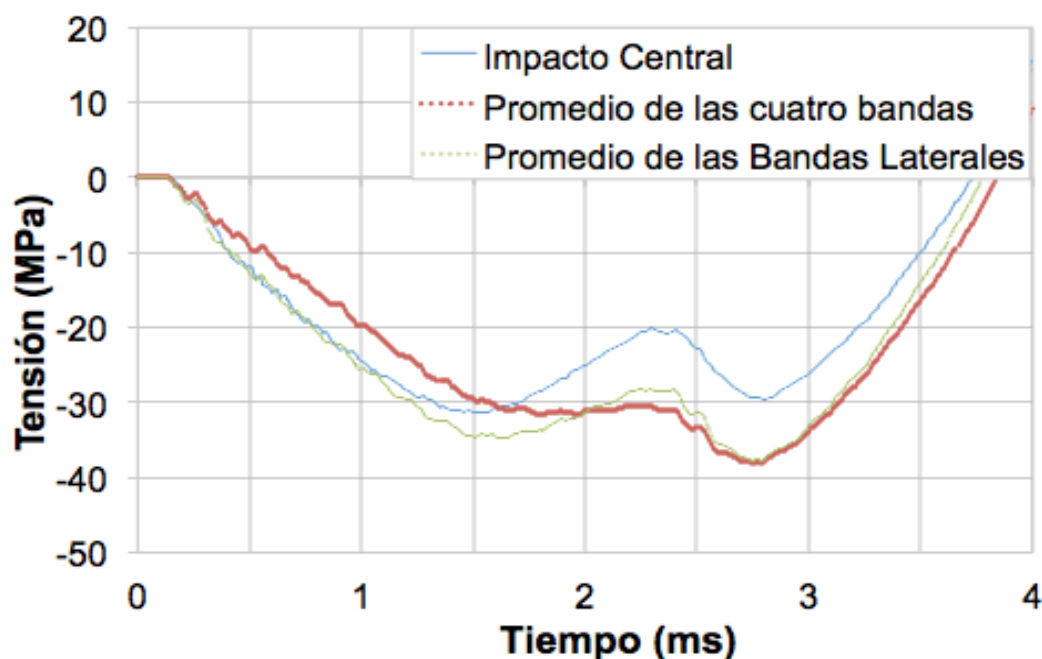
La fuerza de impacto es exactamente la misma, con la diferenciación de las cuatro fases y unos valores muy parecidos. (ANEXO 6)

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO



Gráfica 5.8: Comparación del promedio de la tensión obtenida en las cuatro bandas y en los laterales con los datos originales

Para el siguiente caso, con un desplazamiento de 35 mm en la dirección del primer bisector, se ve que las curvas de los promedios comienzan a distanciarse (Gráfica 5.9). Tanto la del promedio de las cuatro bandas como las opuestas. Además, en el primero deja de reconocerse una onda, si no que se ve un intervalo constante, que por lo menos, corresponde con el valor máximo de la tensión de la simulación original.



Gráfica 5.9: Comparación de la tensión obtenida con el promedio de las cuatro bandas y de las laterales con los datos originales

El error es ya de un 16%. Por otro lado, la fuerza (ANEXO 6) sí corresponde con la original aunque exista una mayor dispersión en la fase de equilibrio.

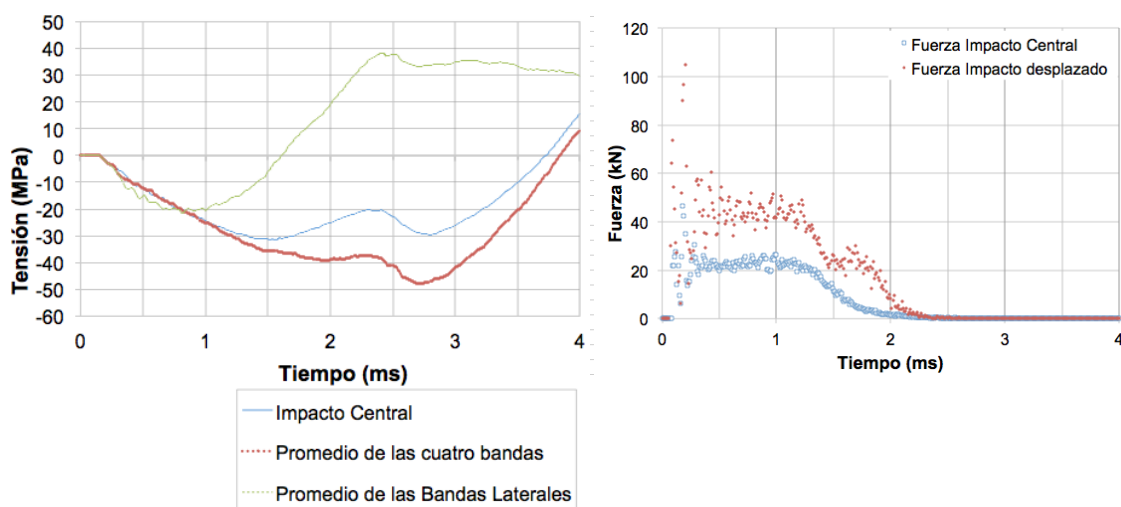
En este caso, sería más preciso escoger el promedio de las cuatro bandas, ya que aunque tiene la desventaja de no estar bien homogeneizada la onda, el valor de la tensión máxima es igual al del impacto central.

En la última variación, a 50 mm en las mismas direcciones, a 70 mm del centro, los resultados ya no son válidos como se comprueba en la Gráfica 5.10. Tanto las banda y sus promedios como la fuerza de impacto han dejado de representar datos similares a los del inicio.

En este caso las tensiones de compresión y flexión son más grandes y afectan a los resultados.

De este apartado se puede concluir que un desplazamiento según uno de los bisectores produce mayores disparidades. El mayor problema que se encuentra, es que no siempre se debe aplicar el mismo método para solventar estas disparidades. Mientras que la gelatina no se aleje demasiadoes mejor utilizar el promedio de las bandas opuestas, pero en cuanto la distancia aumenta, el de las cuatro es más fiable, aunque no siempre se dispone de ello.

Una vez más, el hecho de alejar demasiado el impacto con respecto al centro altera los resultados de forma que es necesario repetir el ensayo.



Gráfica 5.10: Comparación de los resultados para un desplazamiento de 50 mm en los ejes X e Y

5.3 Inclínación de la gelatina

El último parámetro que a variar en este trabajo es la inclinación con la que impacta la gelatina. Quizá esta sea la variación que más ocurre, pues en cuanto el proyectil sale del cañón, la velocidad y fuerza de rozamiento le hacen tender a deformarse y perder la perfecta horizontalidad.

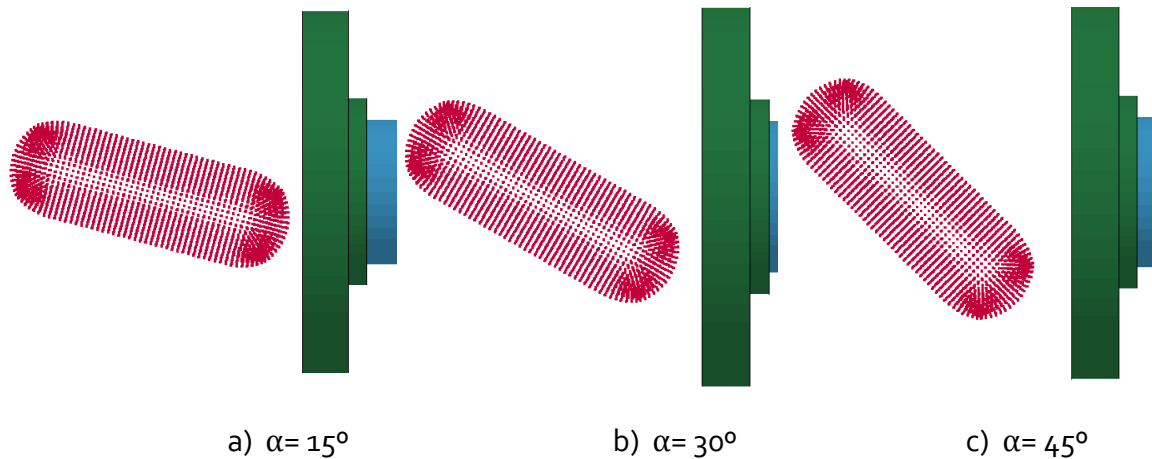


Figura 5.3: Inclínación progresiva de la gelatina

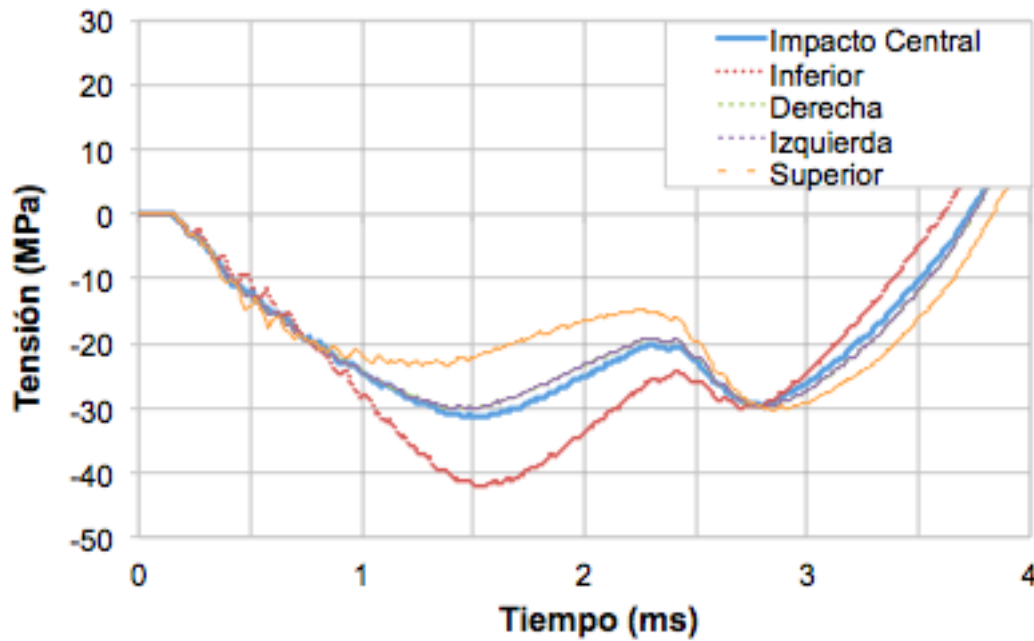
En primer lugar, se conjetura que los resultados obtenidos en las bandas laterales van a ser los mismo, pues la variación está únicamente en el eje Y. Por otro lado, se puede suponer que la inferior sufrirá una compresión mayor a la superior igual que en otros casos, donde las principales diferencias están en el eje de la alteración.

La Gráfica 5.11 muestra los datos que se obtienen con la inclinación de 15° de la gelatina. Tal y como se había predicho, los datos varían únicamente en las bandas del eje Y, pero su promedio es equivalente a los datos originales.

Hay que destacar que en este parámetro, la banda inferior sufre más sobretensión que subtensión tiene la superior. Esto se puede asociar a que la inclinación es hacia abajo y por tanto la zona inferior recibirá antes la onda de impacto de compresión, creando tracción en la zona superior por el momento. Este fenómeno se reconoce en las pendientes de las curvas visualizadas. La de la onda inferior es más pronunciada y llega al punto máximo más tarde que la superior.

En el momento en que registran la onda reflejada, esta ya está homogeneizada y por ello tienen las dos el mismo máximo local.

Una vez más una ligera variación no afecta a la tensión en el tubo o a la fuerza de contacto. El punto máximo de tensión está a los 30 MPa y la fuerza de contacto (ANEXO 6) es igual a la obtenida en el caso original. Al no haber error no es necesario comentar más.



Gráfica 5.11: Comparación de la tensión obtenida en las bandas con la original a 15°

Si se miran los resultados cuando se inclina 30° los máximos de tensión se muestran en la Tabla 5.2, y el promedio en la Gráfica 5.12. Como en las otras dos alteraciones de posición que se han hecho, comienza a haber un error entre los datos originales y los paramétricos, solo que en esta ocasión apenas es de un 5%.

Se reconoce en la tabla la diferencia de tensión máxima entre la superior (9 MPa por debajo) y la inferior (20 MPa por encima).

Por otro lado, la fuerza de impacto se ha incrementado ligeramente en la fase de equilibrio. Esto responde a los datos estadísticos dados en el capítulo 2, donde se decía que según la posición del pájaro durante el impacto las consecuencias pueden ser peores.

Banda	Tensión Máxima (Mpa)
Impacto central	-31,4
Superior	-22,8
Derecha	-30,0
Izquierda	-30,0
Inferior	-51,3

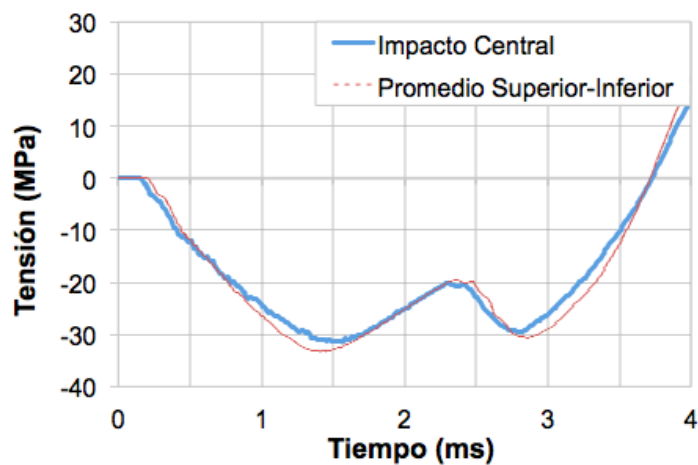
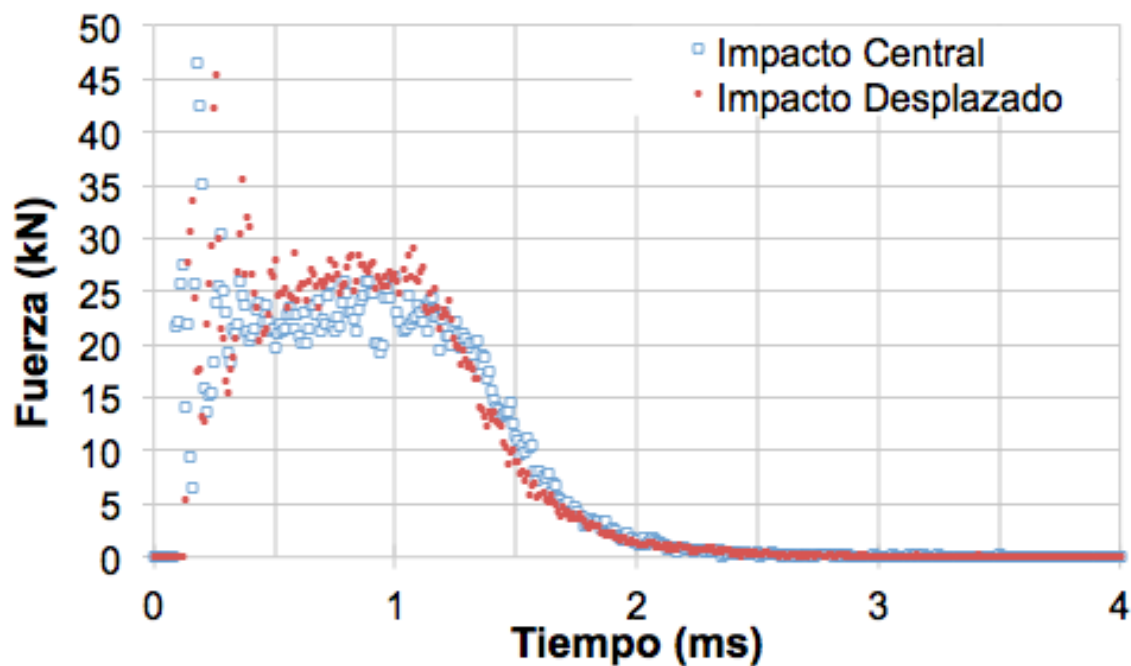


Tabla 5.2: Tensión máxima de las bandas para $\alpha=30^\circ$

Gráfica 5.12: Comparación entre el promedio de la tensión de las bandas superior e inferior con la original a 30°

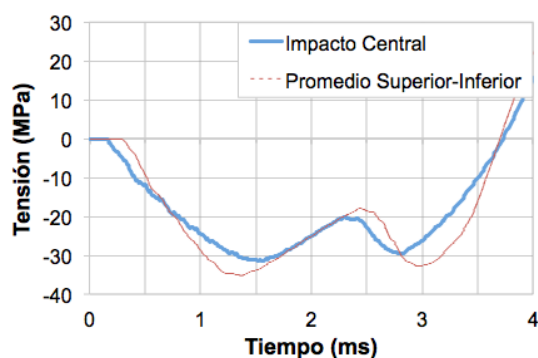
5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

Como es natural, si la fuerza de impacto es mayor, la pendiente de la onda también lo es y así la amplitud para una misma frecuencia. Con esto se explica la pequeña adición en la tensión.

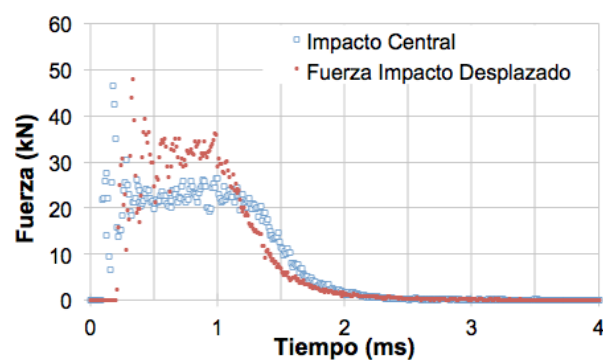


Gráfica 5.13: Comparación de la fuerza obtenida en el análisis paramétrico y la original para una inclinación de 30°

A continuación, con el ensayo a 45° se demuestra que la fuerza de impacto tiene una correlación directa con el ángulo de impacto (Gráfica 5.14). Esta aumenta una vez más lo que provoca un aumento de la pendiente en la onda de tensión inferior y en el promedio.



Gráfica 5.15: Comparación entre el promedio de la tensión de las bandas superior e inferior con la original a 45°



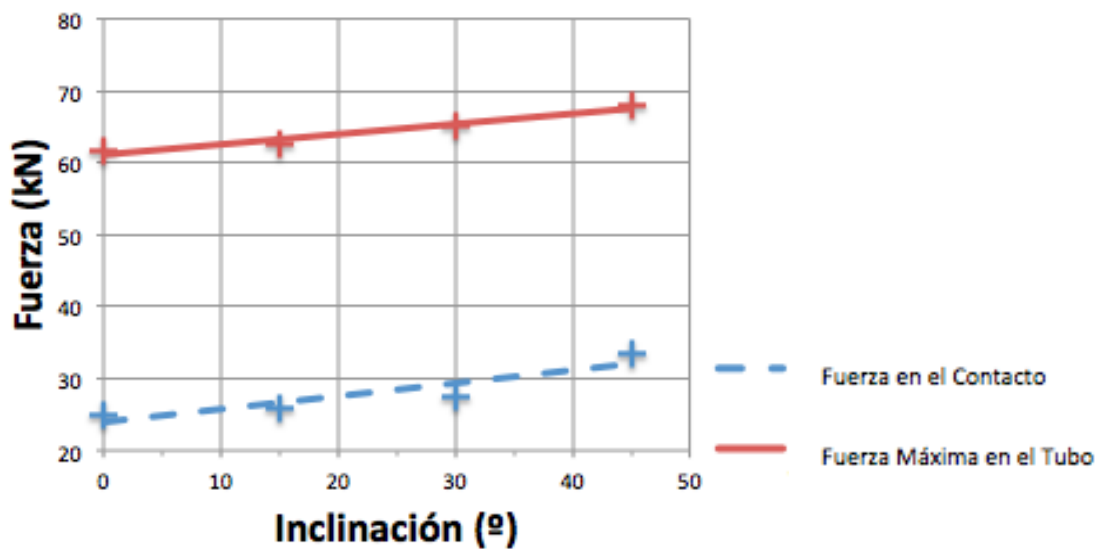
Gráfica 5.14: Comparación de la fuerza obtenida en el análisis paramétrico y la original para una inclinación de 45°

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

Para ver la correlación que existe entre ambos factores, se compara en una tabla los puntos máximos de fuerza en el tubo y la fuerza en el contacto a distintos ángulos. Para visualizar la pendiente, se representan los datos en la Gráfica 5.16.

Ángulo de impacto (°)	Fuerza Máxima del promedio en el Tubo (kN)	Fuerza en el Contacto (kN)
0	61,6	25,0
15	62,7	26,0
30	65,1	27,5
45	67,9	33,5

Tabla 5.3: Comparación de las fuerzas a distintos ángulos de impacto



Gráfica 5.16: Comparación de las fuerzas a distintos ángulos de impacto

Estos cuatro puntos bastan para dar una tendencia creciente con el ángulo de impacto. Con la gráfica se ve como existe un crecimiento con el ángulo de inclinación tanto en la fuerza que sufre el tubo como en la fuerza de contacto, lo que confirma que el aumento de fuerza citado antes es debido a esto. Según el estudio del capítulo 4, a mayor fuerza de impacto mayor periodo de onda, lo que explica las alteraciones.

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

Con esto termina el apartado paramétrico de la inclinación de la gelatina. Se puede afirmar que si en vez de chocar perfectamente paralela al suelo, la gelatina sufre una pequeña inclinación en alguno de los ejes, esto aumenta la pendiente de la onda medida en esos ejes.

Con este resultado se puede suponer que es lo que ha sucedido en alguno de los ensayos comparados. Recuperando la Gráfica 4.4, se observa como la pendiente del ensayo experimental es mayor que la simulada, y según se ha visto en este apartado, puede ser debido a ladeo en el eje X, que es donde están situadas las galgas.

Para resumir este capítulo, se presenta la siguiente tabla:

		Ajuste	Tensión Máxima (Mpa)	Error (%)	Resultados válidos
Variación en eje X	10 mm	Promedio Bandas Laterales	-31,4	0	✓
	25 mm	Promedio Bandas Laterales	-31,4	0	✓
	50 mm	Promedio Bandas Laterales	No hay un mínimo claro	-	✗
Variación en eje Y	7 mm	Promedio Bandas Laterales	-32,6	4	✓
	17 mm	Promedio Cuatro Bandas	-30	4,5	✓
	35 mm	Promedio Bandas Laterales y Cuatro Bandas	No hay un mínimo claro	-	✗
Variación en la inclinación	15°	Promedio Bandas Laterales	-31,5	0	✓
	30°	Promedio Bandas Laterales	-33,2	5	✓
	45°	Promedio Bandas Laterales	-34,6	10	✓

Tabla 5.4: Resultados del Capítulo 5

Gracias a esta tabla, se puede apreciar como según se va aumentando el parámetro que se está estudiando, el error en los resultados aumenta como es lógico.

Los datos de los desplazamientos son bastante significativos. Desviarse unos milímetros del centro no tiene grandes efectos, sin embargo en cuanto el choque se produce fuera de del radio de 25 mm, la onda de impacto se deforma y no proporciona unos datos coherentes.

5. ANÁLISIS Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

Por otro lado, inclinar la gelatina provoca un aumento en la fuerza de impacto y consiguientemente en la onda registrada. Se ha visto claramente que a mayor inclinación mayor fuerza y tensión. Con este parámetro se puede explicar una parte de las divergencias entre los datos experimentales y los del capítulo 4.

En el caso del proyectil a 125 m/s , la tensión máxima era superior en el ensayo físico que en el numérico aunque la velocidad fuera mayor en el último. Gracias a este análisis se puede concluir que, además de otras razones, existiría probablemente una ligera inclinación de la gelatina en el plano paralelo al suelo. En este caso, como la gelatina está impactando principalmente en el centro de la sufridera la onda no se desvirtúa.

Finalmente, queda dar por satisfactorio el estudio realizado que puede ayudar a conocer algunos de los fenómenos que puedan suceder durante el ensayo real y a validar o rechazar algunos resultados.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Introducción

En el presente trabajo fin de grado se ha realizado el modelado numérico y extraído los resultados oportunos del ensayo que se realiza en la Universidad Carlos III de Madrid del impacto de gelatina balística en una placa rígida con el objetivo de medir la onda de impacto en deformación y con ello obtener la tensión y la fuerza. Para ello se ha empleado un código de elementos finitos y unos resultados experimentales previos. Se ha comparado el ensayo a distintas velocidades y analizado la influencia de posibles errores a la hora de realizar los ensayos. A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas y posibles líneas de investigación a seguir.

6.2 Conclusiones

Tras el estudio realizado se puede afirmar que:

- Se ha demostrado que es necesario hacer comprobaciones a los aviones antes de ponerlos en total funcionamiento, pero también que es posible adelantarse y mejorar las prestaciones antes de comprobarlo con un ensayo experimental a base de gelatina balística.
- Se ha descartado definitivamente el método lagrangiano y puesto en práctica el SPH para este tipo de estudios. El comportamiento de la gelatina a altas velocidades se asemeja totalmente al de un fluido.
- Se han encontrado un modelado numérico que simula correctamente el ensayo. Se han realizado varias comparaciones con los datos a distintas velocidades y de las cuatro, tres dan resultados muy satisfactorios y uno correctos. Por tanto, el modelado es válido.
- Gracias al código de elementos finitos utilizado, se ha podido obtener la fuerza real que existe en la zona de impacto además de la que se haya en el tubo, lo cual experimentalmente no es posible. También se ha identificado esta fuerza con las cuatro fases del impacto a alta velocidad de un fluido.
- Por último en lo relativo a los resultados comparativos, existe siempre una diferencia entre los datos experimentales y los simulados que dejan a estos siempre ligeramente por encima en tensión máxima.

En cuanto al estudio paramétrico realizado:

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Un ligera variación en los ejes no afecta notablemente a los resultados. Siempre que el impacto se produzca en el núcleo central de la sufridera, la onda de intensidad será muy similar a la del impacto central. Sin embargo, si se desvía más, aparecen tracciones en las bandas y los resultados dejan de ser coherentes y es necesario repetir el ensayo.
- La inclinación afecta siempre a los resultados y cuanto mayor es, mayor es la tensión en el tubo y la fuerza de contacto.
- Se ha comprobado que siempre se puede realizar una simulación que represente el ensayo y contrastar los resultados para conocer si son verdaderamente coherentes o es necesario repetirlo.

Como conclusión final y que abarca todo el trabajo, se ha encontrado una simulación que permite realizar los mismos ensayos de una forma mucho más económica que en laboratorio para prever qué puede suceder, pero a su vez queda coja sin un verdadero ensayo experimental con el que confrontarse.

6.3 Trabajos Futuros

El desarrollo de esta simulación permite variar rápidamente los parámetros de ensayo, y gracias a la colocación de las cuatro bandas, se han estudiado las principales variaciones que se pueden encontrar. Siguiendo con esta línea de estudio, se proponen los siguientes trabajos como continuación del presente:

- Variación en la trayectoria de impacto. Esto significa que en vez de tener siempre la velocidad en el eje Z, comprobar si ligeras variaciones en el sentido del vector velocidad siguen siendo válidas.
- Análisis del efecto del tipo de partículas. En el trabajo se ha escogido un modelo de partículas sencillo y que no da problemas. Sería interesante escoger algunos más complejos para saber si los datos siguen siendo coherentes y pasan a ser más exactos.

Por otro lado, con un conjunto distinto sería muy interesante desde el punto de vista de las limitaciones enunciadas en la introducción, comprobar si el tubo se puede asemejar a elementos tipo placa y posteriormente si siguiera siendo válido, tipo barra.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Powering global economic growth, employment, trade links, tourism and support or sustainable development through air transport, “Aviation benefits beyond borders”, Air Transport Action Group, *Abril 2014*

- [2] Birdstrike Threat Awareness, “Operating Environment”, Flight Operation Briefing Notes, Airbus, *Octubre 2004*.

- [3] John R. Allan, “The costs of bird strikes and bird strike prevention”, University of Nebraska – Lincoln, Estados Unidos, *Human Conflicts with Wildlife: Economic Considerations*, 2000.

- [4] Bird strike committee USA, “Bird Strike”, *Committee in USA meeting*, 9-11 de Agosto de 2015, [en línea]. Disponible en <http://www.birdstrike.org/> [Consulta Mayo 2016].

- [5] Vuelo 495 de Air France, 26 de Noviembre de 2015 [en línea]. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Vuelo_4590_de_Air_France [Consulta Mayo 2016].

- [6] Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for large Aeroplanes, European Aviation Safety Agency, ED Decisión 2015/019/R-2015.

- [7] Certification Specifications for Engines, European Aviation Safety Agency, ED Decision 2010/015/R-2010.

- [8] itsetsin, “Bird Strikes Jet Engine”, Youtube, 16 de Enero, 2009 [Archivo de video] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=jfXX7qppbc> [consulta : 17 de Mayo de 2016]

- [9] James S. Wilbeck, “Impact Behavior of low strength projectiles”, Informe Técnico AFML-TR-77-134, 1977.

- [10] J.D. Seidt, J.M. Pereira, J.T. Hammer, A. Gilat and C.R. Ruggeri, “Synamic Load Measurement of Ballistic Gelatin Impact Using an

Instrumented Tube”, NASA, Estados Unidos, Informe Técnico 20112-217661, 2012.

- [11] Jun Liu, Yulong Li and Xiaosheng Gao, “Bird strike on a flat plate: Experiments and numerical simulations”, *International Journal of Impact Engineering*, nº 70, pp. 21-37, 2014
- [12] D.S. Cronin, “Ballistic Gelatin Characterization and Constitutive Modeling”, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Canadá, 2011.
- [13] Yaoke Wen, Cheng Xu, Haosheng Wang, Aijun Chen and R.C. Batra, “Impact of steel spheres on ballistic gelatin at moderate velocities”, *International Journal of Impact Engineering*, nº 62, pp. 142-151, 2013.
- [14] V. Nagaraj, T. Velmurugan, “Numerical bird strike impact simulation of aircraft composite structure”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pp. 01-10,
- [15] Artero Guerrero, J.A. “Técnicas empleadas en la modelización numérica de problemas de interacción fluido-estructura”. Trabajo tutelado: Máster en Mecánica Estructural Avanzada,
- [16] Marinko Ugrčić, “Application of the Hydrodynamic Theory and the Finite Element Method in the Analysis of Bird Strike in a Flat Barrier”, *Scientific Technical Review*, Vol. 62, nº 3-4, pp. 28-37, 2012.

OTRA BIBLIOGRAFÍA Y WEBS EMPLEADAS

Propagación de ondas en impactos, Chapter 1, *Ondas Elásticas*

LS- DYNA Keyword User's Manual Volume I. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2015.

LS- DYNA Keyword User's Manual Volume II: Material Models. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2015.

LS- DYNA Keyword User's Manual Volume III: Multi-Physics Solver. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2015.

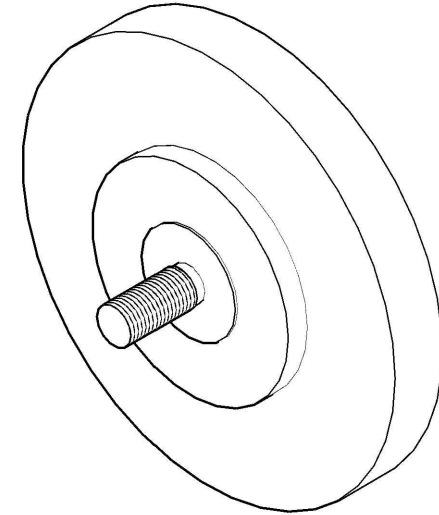
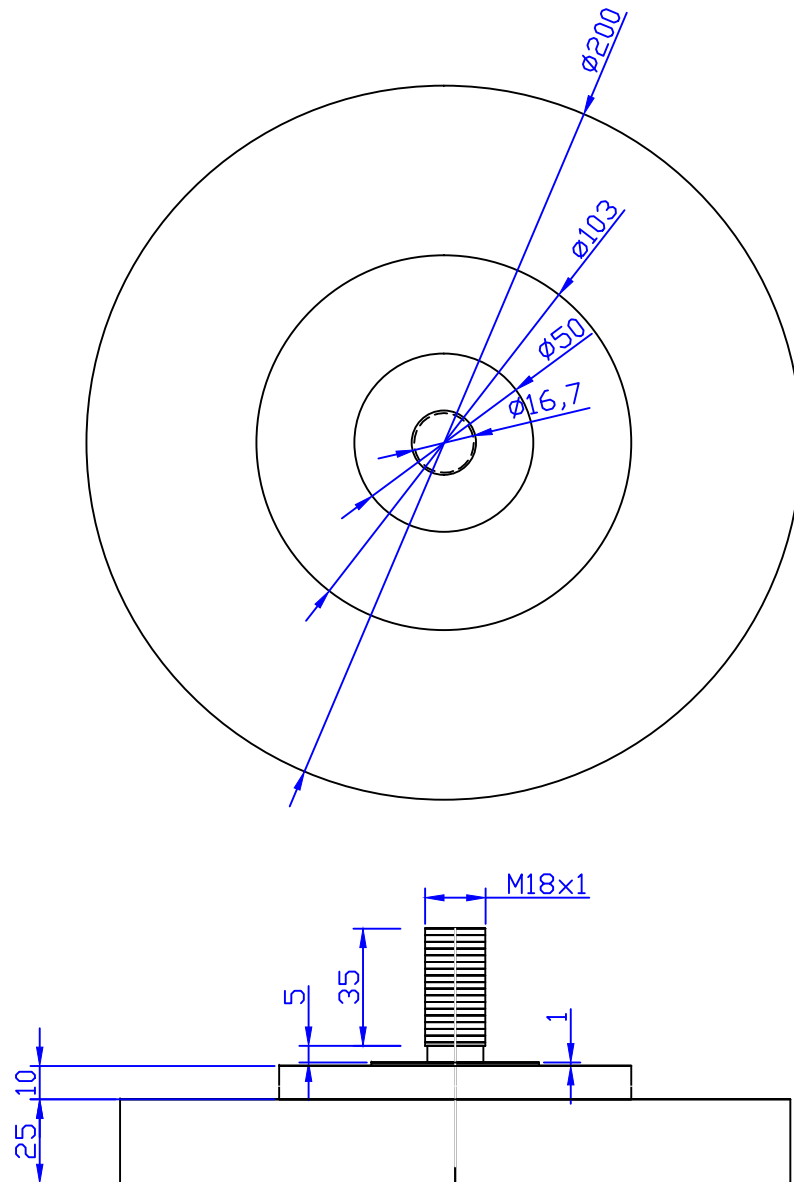
<http://www.dynaexamples.com>

Apuntes de la asignatura de Ingeniería Industrial "Modelización en Mecánica de Sólidos". Tema 9: Técnicas de modelado y postproceso. Universidad Carlos III de Madrid.

Esta página está en blanco de manera intencionada

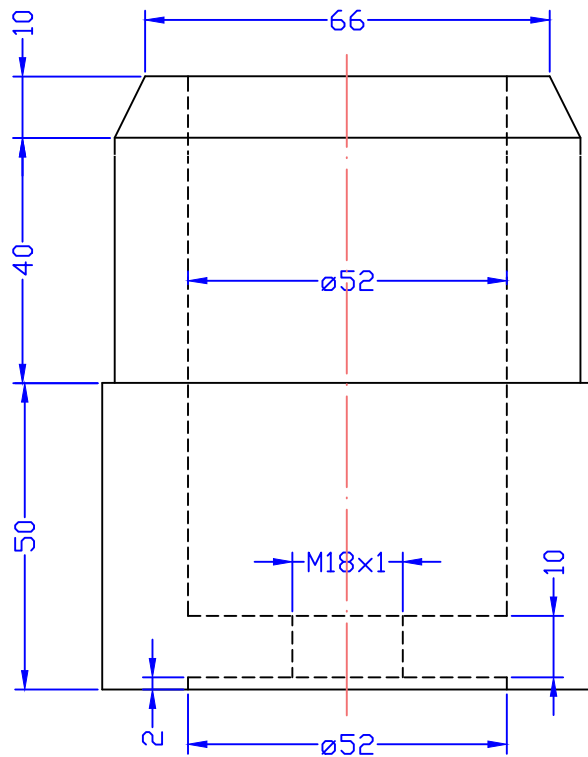
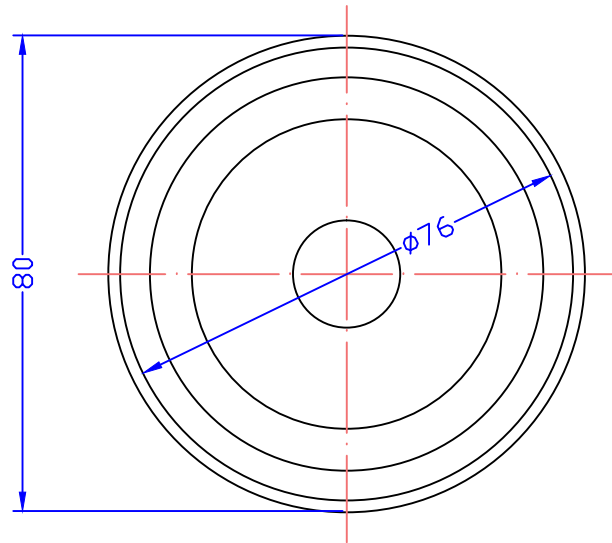
ANEXOS


ANEXO 1 - PLANO ACOTADO DE LA SUFRIDERA



	Universidad Carlos III de Madrid	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR		LabMec LABORATORIO CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES
		DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS		
REALIZADO:		FIRMA:		FECHA:
PEDROCHE ARIAS, DAVID				16 de Sep. de 2015
LÓPEZ PUENTE, JORGE				16 de Sep. de 2015
PLANO:				ESCALA:
SUFRIDERA CÉLULA DE CARGA				SE
				N. PLANO:
				1

ANEXO 2 - PLANO ACOTADO DEL TAPÓN



	Universidad Carlos III de Madrid	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR		LabMec		
		DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS		LABORATORIO CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES		
PARTICIPANTES:			FIRMA:		FECHA:	
REALIZADO: PEDROCHE ARIAS, DAVID					19 de Oct. de 2015	
REVISADO: LOPEZ PUENTE, JORGE					19 de Oct. de 2015	
PLANO:					ESCALA:	Nº PLANO:
TAPÓN CONEXIÓN TUBO-SUFRIDERA					S E	1

ANEXO 3 - REDUCED IMPUT DEL IMPACTO A 150 M/S

LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1 - 08Mar2014(14:00)

Created on May-17-2016 (16:42:37)

*KEYWORD

*TITLE

title

Conjunto Completo Para Ensayos con Gelatina

*CONTROL_CONTACT

##	slsfac	rwpnal	islchk	shlthk	penopt	thkchg	orien	enmass
	0.000	0.000	0	0	0	0	0	

##	usrstr	usrfric	nsbcs	interm	xpene	ssthk	ecdt	tiedprj
	0	0	0	0	0.000	0	0	0

##	sfri	dfri	edc	vfc	th	th_sf	pen_sf
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

##	ignore	frceng	skiprwg	outseg	spotstp	spotdel	spothin
	2	0	0	0	0	0.000	

##	isym	nserod	rwgaps	rwgdt	rwksf	icov	swradf	ithoff
	0	0	1	0.000	0.000	0	0.000	0

##	shldg	pstiff	ithcnt	tdcnof	ftall	unused	shltrw
	1	0	0	0		0.000	

*CONTROL_SPH

##	ncbs	boxid	dt	idim	memory	form	start	maxv
	1	11.0000E+20		0	150	6	0.0001.0000E+15	

##	cont	deriv	ini	ishow	ierod	icont	iavis
	0	0	0	0	0	0	0

*CONTROL_TERMINATION

##	endtim	endcyc	dtmin	endeng	endmas
	4.0000E-3	0	0.000	0.000	0.000

*CONTROL_TIMESTEP

##	dtinit	tssfac	isdo	tslimt	dt2ms	lctm	erode	ms1st
	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0	0	0

##	dt2msf	dt2mslc	imscl	unused	unused	rmscl
	0.000	0	0		0.000	

*DATABASE_ELOUT

##	dt	binary	lcur	ioopt	option1	option2	option3	option4
	1.0000E-5	3	0	1	0	0	0	0

*DATABASE_GLSTAT

##	dt	binary	lcur	ioopt
	0.000	3	0	1

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
0.000		3	0	1

*DATABASE_NCFORC

\$#	dt	binary	lcur	ioopt
1.0000E-5		3	0	1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT

\$#	dt	lcdt	beam	npltc	psetid
1.0000E-4		0	0	0	0

```
$# ioopt
0
```

*DATABASE_BINARY_INTFOR

\$#	dt	lcdt	beam	npltc	psetid
1.0000E-4		0	0	0	0

*DATABASE_EXTENT_INTFOR

\$#	nglbv	nvelo	npresu	nshear	nforce	ngapc
1	1	3	1	1	1	

*DATABASE_HISTORY_SOLID_SET

\$#	id1	id2	id3	id4	id5	id6	id7	id8
11	12	0	0	0	0	0	0	0

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID

\$#	cid	title
	1Tie_Sufridera2_Tapon2	

\$#	ssid	msid	sstyp	mstyp	sboxid	mboxid	spr	mpr
1	2	0	0	0	0	0	0	

\$#	fs	fd	dc	vc	vdc	penchk	bt	dt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.0001.0000E+20	

\$#	sfs	sfm	sst	mst	sfst	sfmt	fsf	vsf
1.000000	1.000000	0.000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID

\$#	cid	title
	2Tie_Tapon2_Tubo	

\$#	ssid	msid	sstyp	mstyp	sboxid	mboxid	spr	mpr
3	4	0	0	0	0	0	0	

\$#	fs	fd	dc	vc	vdc	penchk	bt	dt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.0001.0000E+20	

\$#	sfs	sfm	sst	mst	sfst	sfmt	fsf	vsf
1.000000	1.000000	0.000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

*CONTACT TIED SURFACE TO SURFACE ID

\$#	cid	title
	3Tie_Tapon1_Tubo	

```

$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
    6    5    0    0    0    0    0    0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
    1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$# cid title
    4Tie_Tapon1_Sufridera1
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
    8    7    0    0    0    0    0    0
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
    1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE_ID
$# cid title
    5Contac_Gelatina_Sufridera
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
    13    3    4    3    0    0    1    1
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
    1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_SOLID_TITLE
SetSolid_90
$# sid solver
    11MECH
$# k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k8
    9595 10806 12795 7606 7607 12794 9594 10807
    11594 6407 6406 11595 8394 9607 9606 8395
*SET_SOLID_TITLE
SetSolid_300
$# sid solver
    12MECH
$# k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k8
    9581 10820 12781 7620 10821 12780 7621 9580
    8380 9621 9620 8381 11580 6421 6420 11581
*PART
$# title
Tubo

```


\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	1	1	1	0	0	0	0	

*SECTION_SOLID_TITLE

Solido

\$#	secid	elform	aet
	1	1	0

*MAT_ELASTIC_TITLE

Aluminio Tubo

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used	
	1	2500.00007	0.0600E+10	0.280000	0.000	0.000	0.000	0

*PART

\$# title

Tapon-1

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	2	1	2	0	0	0	0	

*MAT_ELASTIC_TITLE

Aluminio Tapon

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used	
	2	2500.00007	0.1000E+10	0.300000	0.000	0.000	0.000	0

*PART

\$# title

Sufridera-1

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	3	1	3	0	0	0	0	

*MAT_ELASTIC_TITLE

Acero

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used	
	3	7850.00002	0.1000E+11	0.300000	0.000	0.000	0.000	0

*PART

\$# title

Tapon-2

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	4	1	2	0	0	0	0	

*PART

\$# title

Sufridera-2

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	5	1	3	0	0	0	0	

*PART

\$# title

GelatinaSPH

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	6	2	4	1	0	0	0	0

*SECTION_SPH_TITLE

SPH

\$#	secid	cslh	hmin	hmax	sphini	death	start
	2	1.200000	0.200000	2.000000	0.0001.0000E+20	0.000	

*MAT_NULL_TITLE

Gelatina

\$#	mid	ro	pc	mu	terod	cerod	ym	pr
	4	1000.0000	0.000	1.0000E-3	0.000	0.000	0.000	0.000

*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE

EOS

\$#	eosid	c0	c1	c2	c3	c4	c5	c6
	1	0.000	2.2500E+9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

\$#	e0	v0
	0.000	0.000

*INITIAL_VELOCITY_GENERATION

\$#nsid/pid	styp	omega	vx	vy	vz	ivatn	icid
6	2	0.000	0.000	0.000	150.00000	0	0

\$#	xc	yc	zc	nx	ny	nz	phase	irigid
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0

*DEFINE_BOX_TITLE

Box

\$#	boxid	xmn	xmx	ymn	ymx	zmn	zmx
	1	-0.100000	0.100000	-0.100000	0.100000	-0.250000	-8.000E-2

*End

ANEXO 4 - REDUCED INPUT DEL ANÁLISIS MODAL

LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1 - 08Mar2014(14:00)

Created on Apr-26-2016 (18:30:24)

*KEYWORD

*TITLE

title

Conjunto Completo Para Analisis de Vibraciones

*CONTROL_CONTACT

slsfac rwpnal islchk shlthk penopt thkchg orien enmass

0.000 0.000 1 0 0 0 0 0

usrstr usrfrc nsbcs interm xpene ssthk ecdt tiedprj

0 0 0 0 0.000 0 0 1

sfric dfrc edc vfc th th_sf pen_sf

0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

ignore frceng skiprwg outseg spotstp spotdel spothin

2 0 0 0 0 0 0.000

isym nserod rwgaps rwgdtl rwksf icov swradf ithoff

0 0 1 0.000 0.000 0 0.000 0

shldg pstiff ithcnt tdcnof ftall unused shltrw

1 0 0 0 0 0.000

*CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS

imass gamma beta tdybir tdydth tdybur irate

1 0.500000 0.250000 0.0001.0000E+28 1.0000E+28 0

*CONTROL_IMPLICIT_EIGENVALUE

neig center lflag lftend rflag rhtend eigmth shfscl

90 0.000 0 0.000 0 3000.0000 2 0.000

isolid ibeam ishell itshell mstres evdump

0 0 0 0 0 0

*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL

imflag dt0 imform nsbs igs cnstn form zero_v

1 0.000 2 1 2 0 0 0

*CONTROL_IMPLICIT_SOLUTION

nsolvr ilimit maxref ddtol ectol rdtol ldtol abstol

2 11 15 1.0000E-3 1.0000E-21.0000E+10 0.9000001.0000E-10

dnorm diverg istif nlprint nlnorm d3itctl cpchk

2 1 1 0 2 0 0

arcctl arcdir arclen arcmth arcdmp

0 0 0.000 1 2

lsmtl lsdir irad sradi awgt sred

1 2 0.000 0.000 0.000 0.000

*CONTROL_IMPLICIT_SOLVER

Isolvr	lprint	negev	order	drcm	drcprm	autospc	autotol
4	2	2	0	1	0.000	1	0.000

\$# lcpack mtxdmp

2	0
---	---

*CONTROL_TERMINATION

endtim	endcyc	dtmin	endeng	endmas
1.000000	0	0.000	0.000	0.000

*DATABASE_GLSTAT

dt	binary	lcur	ioopt
0.000	1	0	1

*DATABASE_MATSUM

dt	binary	lcur	ioopt
0.000	1	0	1

*DATABASE_BINARY_D3PLOT

dt	lcdt	beam	npltc	psetid
1.0000E-2	0	0	0	0

\$# ioopt

0

*BOUNDARY_SPC_SET_ID

id	heading
1	Restriccion_xy_Giros

nsid	cid	dofx	dofy	dofz	dofrx	dofry	dofrz
7	0	1	1	0	1	1	1

*SET_NODE_LIST_TITLE

SetNode_Recta_Tubo

sid	da1	da2	da3	da4	solver
7	0.000	0.000	0.000	0.000	MECH

nid1	nid2	nid3	nid4	nid5	nid6	nid7	nid8
119925	0	0	0	0	0	0	0

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID

cid	title
1	Tie_Sufridera2_Tapon2

ssid	msid	sstyp	mstyp	sboxid	mboxid	spr	mpr
1	2	0	0	0	0	0	0

fs	fd	dc	vc	vdc	penchk	bt	dt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	1.0000E+20

sfs	sfm	sst	mst	sfst	sfmt	fsf	vsf
1.000000	1.000000	0.000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID

cid	title
-----	-------

```

6Tie_Tapon2_Tubo
$# ssid  msid  sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
    3    4    0    0    0    0    0    0
$#  fs   fd   dc   vc   vdc  penchk   bt   dt
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000    0 0.0001.0000E+20
$#  sfs  sfm  sst  mst  sfst  sfmt   fsf  vsf
    1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#  cid                                     title
    7Tie_Tubo_Tapon1
$# ssid  msid  sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
    6    5    0    0    0    0    0    0
$#  fs   fd   dc   vc   vdc  penchk   bt   dt
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000    0 0.0001.0000E+20
$#  sfs  sfm  sst  mst  sfst  sfmt   fsf  vsf
    1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#  cid                                     title
    8Tie_Tapon1_Sufridera1
$# ssid  msid  sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
    8    7    0    0    0    0    0    0
$#  fs   fd   dc   vc   vdc  penchk   bt   dt
    0.000 0.000 0.000 0.000 0.000    0 0.0001.0000E+20
$#  sfs  sfm  sst  mst  sfst  sfmt   fsf  vsf
    1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*PART
$# title
Tubo
$#  pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
    1    1    1    0    0    0    0    0
*SECTION_SOLID_TITLE
Solido
$#  secid  elform  aet
    1    1    0
*MAT_ELASTIC_TITLE
Aluminio Tubo
$#  mid  ro  e  pr  da  db not used
    1 2500.00007.0600E+10 0.280000 0.000 0.000 0
*PART
$# title
Tapon-1

```

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	2	1	2	0	0	0	0	

*MAT_ELASTIC_TITLE

Aluminio Tapon

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used	
	2	2500.00007	1.1000E+10	0.300000	0.000	0.000		0

*PART

\$# title

Sufridera-1

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	3	1	3	0	0	0	0	

*MAT_ELASTIC_TITLE

Acero

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used	
	3	7850.00002	1.1000E+11	0.300000	0.000	0.000		0

*PART

\$# title

Tapon-2

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	4	1	2	0	0	0	0	

*PART













\$# title

Sufridera-2

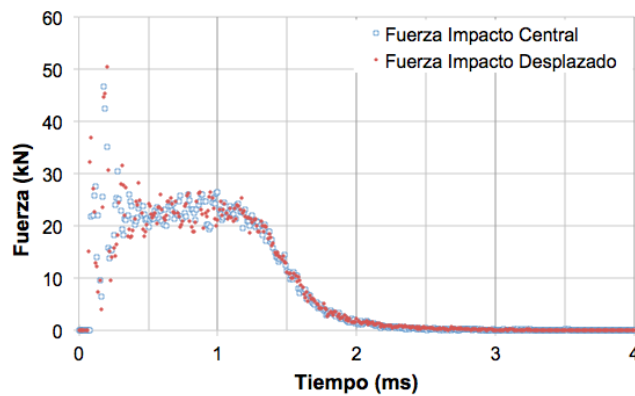
\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	5	1	3	0	0	0	0	

*END

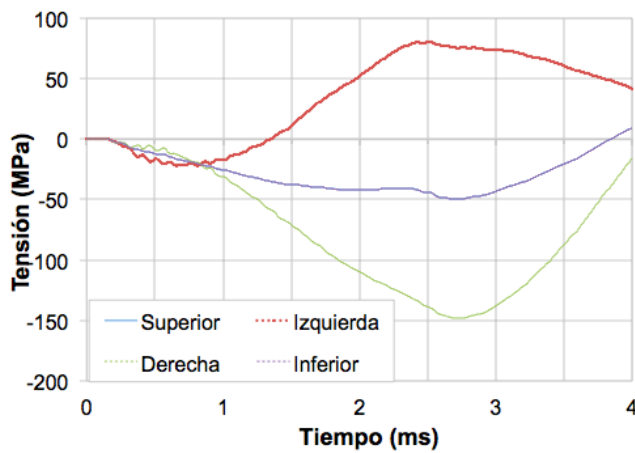
ANEXO 5 - FRECUENCIAS MODALES DEL CONJUNTO

Frecuencia	Modo de vibración
7 Hz 	
25 Hz 	
54 Hz 	
66 Hz 	
144 Hz 	
203 Hz 	

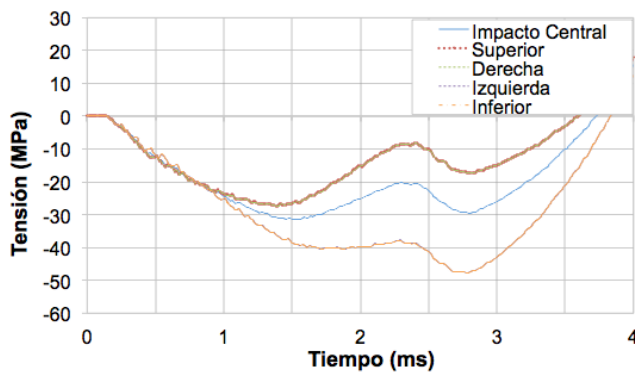
ANEXO 6 - GRÁFICAS DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO



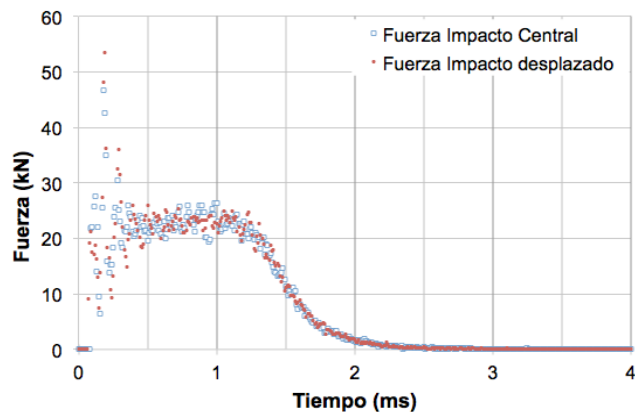
Comparación de la fuerza obtenida entre en el análisis paramétrico y la original para un desplazamiento en X de 25 mm



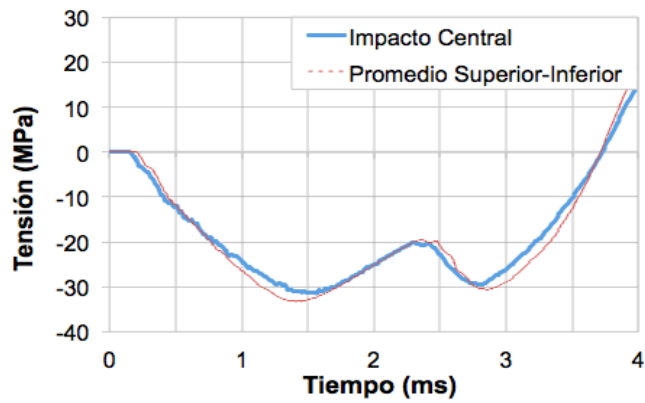
Tensión obtenida en las bandas para un desplazamiento en X de 50 mm



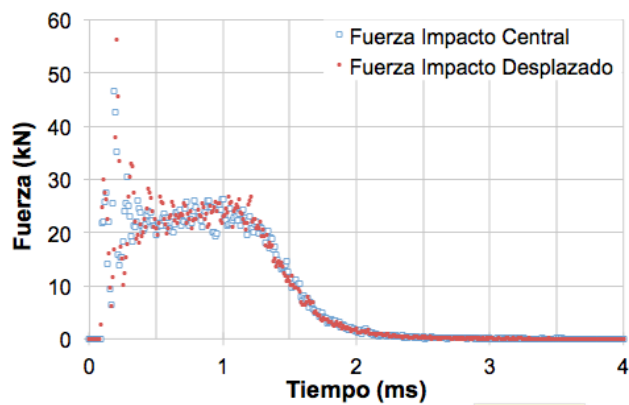
Tensión obtenida en las bandas para un desplazamiento en XY de 7 mm



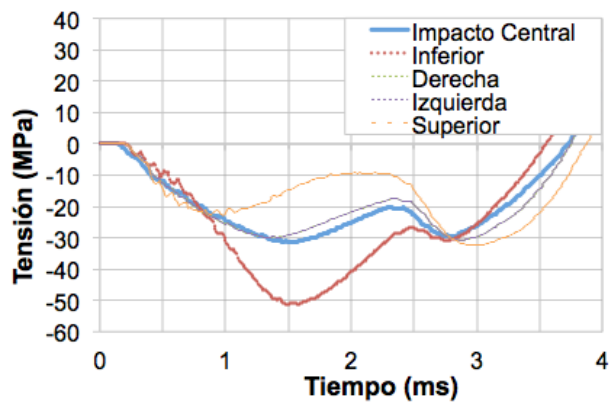
Comparación de la fuerza obtenida entre en el análisis paramétrico y la original para un desplazamiento en XY de 17 mm



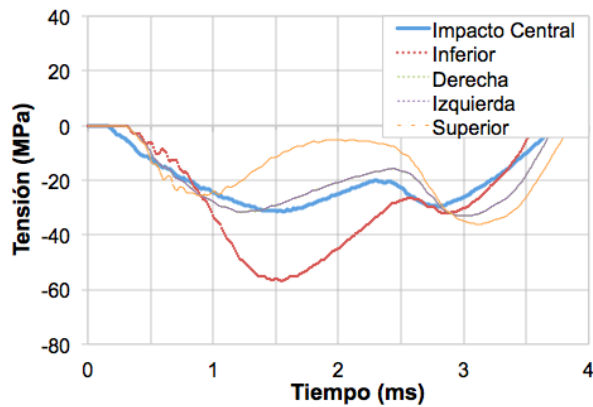
Comparación entre el promedio de la tensión de las bandas superior e inferior con la original a 15°



Comparación de la fuerza obtenida entre en el análisis paramétrico y la original para una inclinación de 15°



Tensión obtenida en las bandas para una inclinación de 30°



Tensión obtenida en las bandas para una inclinación de 45°

